

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR  
RAPHAËLLE LANDRY

TYPE DE MODES DE GESTION DES CRUES SAISONNIÈRES ET  
LEURS IMPACTS SUR LA RELATION ENTRE LE CLIMAT ET  
LES DÉBITS EN AVAL DES BARRAGES AU QUÉBEC (CANADA)

DÉCEMBRE 2013

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## COMITÉ D'ÉVALUATION

### **Directeur**

Ali A. Assani (Ph. D.)

Laboratoire d'hydroclimatologie et de Géomorphologie fluviale et Centre de recherche sur les interactions bassins versants écosystèmes aquatiques (RIVE)

Département des sciences de l'environnement

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)

G9A 5H7

### **Membres du comité d'évaluation**

Jean-François Quessy (Ph. D.)

Département de mathématiques et d'informatique

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)

G9A 5H7

Mhamed Mesfioui (Ph. D.)

Département de mathématiques et d'informatique

Université du Québec à Trois-Rivières

C.P. 500, Trois-Rivières (Québec)

G9A 5H7

## AVANT-PROPOS

La rédaction de ce mémoire s'est faite conformément à l'article 138.1 du règlement des études de cycles supérieurs « rédaction sous forme d'articles scientifiques » permettant de présenter les résultats obtenus dans le cadre d'une maîtrise de recherche en sciences de l'environnement sous forme d'article scientifique plutôt que sous forme traditionnelle. Ce mémoire divulgue la synthèse de mes travaux portant sur les types de modes de gestion des crues saisonnières et leurs impacts sur la relation entre le climat et les débits en aval des barrages au Québec (Canada).

Ce document est divisé en trois chapitres. Le premier consiste en une introduction suivie d'un résumé substantiel du projet de recherche. Le second chapitre est présenté sous la forme d'article scientifique. Cet article a pour titre: «The management modes of seasonal floods and their impact on the relationship between climate and streamflow downstream from dams in Quebec (Canada) » et a été publié dans la revue *River Research and Applications*. Le troisième et dernier chapitre expose les conclusions générales qui ressortent de cette étude. Je suis première auteure (R.L) de cet article suivi de M. Ali A. Assani (A.A), Mme Stacey Biron (S.B) et M. Jean-François Quessy (J-F. Q).

Conception et idées de recherche : A.A, R.L

Formulation des objectifs et hypothèses : R.L, A.A

Analyses des données : R.L, A.A.

Résultats et Discussion : R.L, A.A, S.B, J-F. Q.

Écriture de l'article : R.L, A.A

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier spécialement mon directeur de recherche, le professeur Ali Assani, qui m'a permis tout d'abord de me familiariser avec la recherche scientifique dès la fin de ma première année au Baccalauréat en géographie. Je le remercie également pour son support, ses conseils, sa confiance et particulièrement pour son dévouement envers ses étudiants et envers la recherche. Je suis fière d'être dans son équipe et c'est l'expérience que j'ai acquise dans son laboratoire qui m'a donné envie de poursuivre mes études aux cycles supérieurs et sans lui, ce projet n'aurait jamais vu le jour.

J'aimerais aussi remercier les professeurs, Jean-François Quessy et Mhamed Mesfioui, membres de mon comité d'évaluation, pour leurs idées et leurs conseils judicieux durant mon parcours et pour leur implication dans ce projet.

Je désirerais aussi remercier M. Thomas Rousseau-Baumier (Maîtrise en sciences de l'environnement à l'Université du Québec à Trois-Rivières) qui m'a appuyée en ce qui concerne les aspects hydrologiques de ma maîtrise. Je veux remercier tout particulièrement mon copain et collègue Guillaume Légaré-Couture (Doctorant en sciences de la terre à l'Institut national de recherche scientifique) pour son aide en géomatique, mais surtout pour son soutien et ses encouragements dans les bons moments comme dans les plus difficiles.

Je voudrais également présenter mes remerciements à mes professeurs, Gilbert Cabana, Hélène Glémet, Esther Levesque, Stéphane Campeau et Guy Samson qui m'ont permis d'avancer dans mon cheminement scientifique et qui m'ont partagé leur passion pour la recherche. Merci à Philippe Massicotte pour sa disponibilité et pour son aide concernant les logiciels statistiques. Une sincère pensée à tous mes amis et collègues du LIAGE avec qui j'ai partagé mon quotidien pendant ces deux années. Merci à tous les étudiants en sciences de l'environnement avec qui une forte collégialité s'est installée.

Un gros merci à mes deux coéquipiers Vernhar Beaulac et Karine Lacasse qui sont à mes côtés depuis l'entrée au Baccalauréat et qui ont parcouru la même route que moi.

Merci au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), aux Fonds québécois pour la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT) ainsi qu'à la Fondation du C.E.U. de l'Université du Québec à Trois-Rivières qui m'ont permis d'entreprendre ma maîtrise sans soucis financiers.

Enfin, je veux remercier du fond du cœur mes amis et ma famille, tout particulièrement mon père, pour avoir cru en moi.

## RÉSUMÉ

Cette étude avait pour but de comparer les modes de gestion de crues saisonnières au niveau des barrages et d'analyser leurs impacts sur la relation entre les variables climatiques et les débits en aval de ces barrages. En aval du barrage de Rawdon (rivière Ouareau) qui induit un régime hydrologique régularisé de type naturel, le mode de gestion de crues dominant est de type A, c'est-à-dire que les crues saisonnières en site naturel et en aval du barrage sont générées par les mêmes épisodes de pluies et/ou de fonte de neige. Par conséquent, l'occurrence de la crue saisonnière est quasiment synchrone en rivière naturelle et en aval du barrage. En revanche, en aval du barrage Matawin (rivière Matawin) qui induit un régime hydrologique régularisé de type inversion, les modes de gestion de crues les plus fréquents sont de types B et D, c'est-à-dire que les crues saisonnières en amont et en aval du barrage ne sont pas générées par les mêmes épisodes de pluies et/ou de fonte de neige. Par conséquent, leur occurrence n'est pas synchrone sur les deux sites. Cette différence de mode de gestion de crues saisonnières a un impact sur la variabilité interannuelle de la magnitude des débits maximums journaliers saisonniers associée à ces crues saisonnières. Ainsi, en aval du barrage Matawin, la variabilité interannuelle de ces débits est significativement différente de celle des débits en amont du barrage. Aucune corrélation n'a été ainsi observée entre les variables climatiques et les débits en aval du barrage de Matawin. Cependant, cette absence de corrélation s'est estompée progressivement à l'échelle annuelle où les débits sont corrélés aux pluies de la même façon qu'en amont du barrage.

Mots-clés : Débits extrêmes journaliers, régime hydrologique régularisé, mode de gestion de crues, température, précipitation, barrages, Québec.

## TABLE DES MATIÈRES

<b>COMITÉ D'ÉVALUATION.....</b>	<b>ii</b>
<b>AVANT-PROPOS.....</b>	<b>iii</b>
<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>iv</b>
<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>vi</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>x</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES .....</b>	<b>xii</b>
<b>CHAPITRE I</b>	
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1 Mise en contexte .....	1
1.1.1 Les changements climatiques .....	1
1.1.1.1 Le climat actuel et passé .....	2
1.1.1.2 Le climat projeté .....	3
1.1.2 Les ressources hydriques au Québec .....	4
1.1.3 Les barrages, les réservoirs et les digues .....	5
1.1.4 L'hydro-électricité au Québec .....	6
1.1.4.1 Les barrages et le climat .....	8
1.1.5 Impacts environnementaux des barrages .....	8
1.2 La problématique – Revue de littérature .....	9
1.2.1 Types de régimes hydrologiques régularisés .....	10
1.2.1.1 Régime hydrologique régularisé de type inversion .....	10
1.2.1.2 Régime hydrologique régularisé de type homogénéisation.....	11
1.2.1.3 Régime hydrologique régularisé de type naturel .....	11
1.2.2 La controverse.....	13
1.3 Objectifs et hypothèses de l'étude .....	14
<b>MÉTHODOLOGIE .....</b>	<b>15</b>
1.4 Description des bassins versants et méthodes d'analyse de données .....	15
<b>RÉSULTATS ET CONCLUSION .....</b>	<b>19</b>



**CHAPITRE II**

<b>THE MANAGEMENT MODES OF SEASONAL FLOODS AND THEIR IMPACT ON THE RELATIONSHIP BETWEEN CLIMATE AND STREAMFLOW DOWNSTREAM FROM DAMS IN QUEBEC (CANADA) .....</b>	<b>21</b>
Abstract .....	23
Introduction .....	24
Methods.....	25
Choice of the watershed, watershed description and choice of stations.....	25
Composition and statistical analysis of hydroclimatic series .....	31
Results.....	33
Comparison of the types of seasonal flood management mode and their frequency in the two watersheds.....	33
Impacts of flood management mode on the interannual variability of the magnitude of seasonal floods.....	39
Link between climate variables and streamflow .....	45
Discussion and conclusion .....	48
Références .....	51
<b>CHAPITRE III</b>	
<b>CONCLUSION .....</b>	<b>54</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>56</b>

## LISTE DES TABLEAUX

2.1	Characteristics of two dams .....	31
2.2	Comparaison of the interannual variability of seasonal daily maximum extreme flows in a natural setting (pristine) and downstream from dams (1930-2008). Lombard method results .....	40
2.3	Coefficients of correlation calculated between seasonal daily maximum flows and climate variables upstream and downstream from the Matawin dam (1930-2008).....	46
2.4	Coefficients of correlation calculated between seasonal daily maximum flows and climate variables (1930–2008). L'Assomption and Ouareau Rivers .....	46
2.5	Coefficients of correlation calculated between seasonal daily mean flows and climate variables (1930-2008).....	47
2.6	Coefficients of correlation calculated between mean annual flows and climate variables (1930-2008) .....	48

## LISTE DES FIGURES

1.1	Distribution spatiale des trois types de régime hydrologique au Québec/. 10	
1.2	Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits .....	12
2.1	Location of study area.....	27
2.2	Comparison of monthly discharge coefficients in pristine setting and downstream from dams.....	28
2.3	Type A seasonal flood management mode. Seasonal floods in the natural setting (blue line) and downstream from the dam (red line) are produced by the same rainfall and/or snowmelt events and are synchronous .....	35
2.4	Type B seasonal flood management mode. Seasonal floods in the natural setting (blue line) and downstream from the dam (red line) are not produced by the same rainfall and/or snowmelt events and are not synchronous .....	36
2.5	Type C seasonal flood management mode. Seasonal floods in the natural setting (blue line) and downstream from the dam (red line) are not produced by the same rainfall and/or snowmelt events. The timing of seasonal floods in the natural setting coincides with low flows downstream from the dam .....	36
2.6	Type D seasonal flood management mode (man-made flood). Seasonal floods in the natural setting (blue line) and downstream from the dam (red line) are not produced by the same rainfall and/or snowmelt events. The timing of seasonal floods downstream from the dam coincides with low flows upstream from the dam .....	37
2.7	Seasonal frequency of the different types of seasonal floods observed downstream from the Rawdon dam (blue bars) and the Matawin dam (red bars) from 1930 to 2008. (a) Fall; (b) winter; (c) spring; (d) summer.....	38
2.8	Comparison of interannual variability of fall daily maximum flows in pristine setting and downstream from dams. (a) Upstream (black curve) and downstream from the Matawin dam (red curve) on the Matawin river. (b) In a natural setting (L'Assomption River, black curve) and downstream from the Rawdon dam (Ouareau River, red curve) .....	41
2.9	Comparison of interannual variability of winter daily maximum flows in pristine setting and downstream from dams. (a) Upstream (black curve) and downstream from the Matawin dam (red curve) on the Matawin River. (b) In a natural setting (L'Assomption River, black curve) and downstream from the Rawdon dam (Ouareau River, red curve) .....	42

2.10	Comparison of interannual variability of spring daily maximum flows in pristine setting and downstream from dams. (a) Upstream (black curve) and downstream from the Matawin dam (red curve) on the Matawin River. (b) In a natural setting (L'Assomption River, black curve) and downstream from the Rawdon dam (Ouareau River, red curve).....	43
2.11	Comparison of interannual variability of summer daily maximum flows in pristine setting and downstream from dams. (a) Upstream (black curve) and downstream from the Matawin dam (red curve) on the Matawin river. (b) In a natural setting (L'Assomption River, black curve) and downstream from the Rawdon dam (Ouareau River, red curve).....	44

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
EDT	Écart diurne des températures
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HQ	Hydro-Québec
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MDDEP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec
ONU	Organisation internationale des Nations Unies
OMM	Organisation météorologique mondiale
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'environnement
UQTR	Université du Québec à Trois-Rivières

# CHAPITRE I

## INTRODUCTION

### 1.1 Mise en contexte

#### 1.1.1 Les changements climatiques

Les changements climatiques sont depuis plusieurs années, un sujet d'actualité sans cesse en évolution. Plusieurs débats ont ressorti de cette problématique mondiale et de nombreux gouvernements en ont fait leur objet d'étude, conscients du problème que pourraient occasionner ces changements à l'échelle de la planète. C'est en 1988 que le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)<sup>1</sup> fut créé. Le GIEC est un organe intergouvernemental qui est ouvert à tous les pays membres de l'Organisation internationale des Nations Unies (ONU) et de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) (IPCC 2012).

Un rapport<sup>2</sup> sur les changements climatiques a été publié par le GIEC en 2008. Quelques faits saisissants ressortent de celui-ci, en voici un extrait : « onze des douze dernières années (1995-2006) figurent parmi les douze années les plus chaudes depuis 1850, date à laquelle ont débuté les relevés instrumentaux de la température à la surface du globe. [...] De même, certains systèmes hydrologiques ont été perturbés par l'intensification du ruissellement et la précocité des crues de printemps dans de nombreux cours d'eau alimentés par la fonte des glaciers et de la neige ainsi que par la modification de la structure thermique et de la qualité de l'eau dues au réchauffement des lacs et des rivières. »

---

<sup>1</sup> Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été établi conjointement par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE).

<sup>2</sup> GIEC, 2007 : Bilan 2007 des changements climatiques : rapport de synthèse

Bien que ces changements climatiques soient reconnus au niveau planétaire, il est important de les analyser plus localement afin de mieux cerner le portrait climatique régional et ainsi aider la population à affronter ces impacts qui s'amplifient. Ces impacts se sont traduits par l'occurrence des événements météorologiques et hydrologiques extrêmes au Québec notamment au cours des dernières années ce qui a démontré la grande vulnérabilité de la société face aux aléas du climat. C'est dans cette optique qu'est née l'organisation québécoise et canadienne Ouranos<sup>3</sup> en 2001. Le gouvernement canadien s'est également penché sur la question et a produit un rapport<sup>4</sup> en 2007 qui rend compte des progrès accomplis au cours des dix dernières années dans l'étude de la vulnérabilité du Canada aux changements climatiques. Le chapitre 5 de ce document porte plus particulièrement sur le Québec.

#### *1.1.1.1 Le climat actuel et passé*

Des ouvrages généraux<sup>5</sup> portant sur l'adaptation aux changements climatiques ont été publiés par Ouranos en 2004 et en 2010. Ces ouvrages permettent entre autres de répondre à la question suivante : y a-t-il un réchauffement significatif au Québec depuis le dernier siècle? Selon ces rapports, le Québec a connu un réchauffement du début du 20<sup>e</sup> siècle jusqu'au début des années 1940 suivi d'un léger refroidissement jusqu'au milieu des années 1970. À compter de cette date, les températures augmentent de manière assez prononcée jusqu'à aujourd'hui. C'est au cours des dernières décennies (1960-2005) que le climat québécois change de manière significative. Les températures moyennes dans le sud du Québec ont augmenté de 0,2 à 0,4 °C par décennie (Yagouti et al., 2008), le réchauffement étant plus important pour les températures minimales

---

<sup>3</sup> Ouranos est un consortium de recherche sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, initiative conjointe du gouvernement du Québec, d'Hydro-Québec et du Service météorologique du Canada avec la participation de l'UQAM, de l'INRS et des universités Laval et McGill.

<sup>4</sup> Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007. Le chapitre 5 portant sur le Québec a été rédigé par Ouranos.

<sup>5</sup> S'adapter aux changements climatiques, Ouranos 2004 et Savoir s'adapter aux changements climatiques, Ouranos 2010.

(nocturnes) que maximales (diurnes) (Zhang et al., 2000; Vincent et Mekis, 2006; Yagouti et al., 2008), ce qui entraîne une diminution de l'écart diurne de la température (EDT). L'augmentation de la température est plus importante durant la nuit que le jour, en d'autres termes, le Québec devient moins froid. À noter que le réchauffement est plus marqué en saison hivernale qu'en saison estivale. D'après Yagouti et al. (2008), la hausse des températures se manifeste aussi par l'augmentation du nombre de degrés-jours de croissance, par une saison de gel plus courte et par la diminution du nombre de degrés-jours de chauffage.

En ce qui concerne les précipitations, une augmentation du nombre de jours avec des précipitations de faible intensité (Vincent et Mekis, 2006) ainsi qu'une diminution des précipitations sous forme de neige dans le Sud du Québec est observée (Brown, 2010; Bates et al., 2008). En résumé, un adoucissement des hivers et des étés plus chauds et humides définissent les changements climatiques québécois jusqu'à nos jours.

#### *1.1.1.2 Le climat projeté*

La température moyenne annuelle du Québec a augmenté au cours des dernières décennies et continuera d'évoluer dans le futur. Certaines études prédisent de façon générale que les températures s'élèveront de manière plus prononcée en hiver qu'en été sur l'ensemble de la province et également dans les régions nordiques de l'Amérique du Nord (Christensen et al., 2007, Plummer et al., 2006). Les prévisions d'augmentation de la température hivernale pour le sud du Québec à l'horizon 2050 varient de 2,5 à 3,8 °C tandis que la variation estivale passe de 1,9 °C à 3,0 °C. Conséquemment, une augmentation de l'évapotranspiration viendra incontestablement modifier le régime hydrique. Une hausse des précipitations hivernale de 8,6 % à 18,1 % est également prévue pour cette période (Ouranos, 2010). Cette hausse des précipitations entraînera une diminution du couvert de neige puisque les précipitations liquides seront plus fréquentes en raison de l'augmentation des températures (Christensen et al., 2007).



Selon ces prédictions, ces changements perturberont le régime hydrique des rivières en influençant la fréquence et l'amplitude des crues. Les débits des rivières au Québec sont principalement conditionnés par l'apport en eau lors de fonte des neiges, venant du stockage de la neige et de la glace hivernale. La diminution du couvert de neige et de glace est donc un aspect très important qui influencera assurément les régimes hydriques québécois. Les crues printanières seront devancées alors que les débits maximums lors de ces crues diminueront puisque le stockage d'eau sous forme de neige et de glace sera réduit. La réduction du cumul de neige est une variable très importante de l'hydrologie et déterminera la viabilité hivernale au Québec ainsi que la distribution des débits sur toute l'année (Ouranos 2010).

Par ailleurs, les changements climatiques prévus seront caractérisés par une hausse des événements extrêmes. Notamment, une augmentation de la fréquence des journées aux températures très élevées durant la saison estivale est prévue (Ouranos 2010). Une prolongation de la saison propice aux orages ainsi qu'une hausse des événements de pluies très intenses (Mailhot et al., 2007) sont d'autres événements prédits, et ce, malgré le fait que la moyenne des précipitations ne change pas durant la saison estivale. Les périodes d'étiages estivales seront, quant à elles, plus rudes et plus longues. La sécheresse, les tempêtes, les vagues de froid et les canicules sont des impacts qui affecteront la population, mais également les écosystèmes et les milieux naturels.

### **1.1.2 Les ressources hydriques au Québec**

Le Québec regorge de ressources hydriques, 10 % du territoire sont recouverts d'eau douce, ce qui comprend 4 500 rivières et plus d'un demi-million de lacs. De plus, le Québec possède 235 stations de mesure des niveaux et des débits des principaux cours d'eau et 5549 barrages dont 780 publics (Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), <http://www.cehq.gouv.qc.ca/index.asp>, page consultée le 1<sup>er</sup> février 2012). La population du Québec, équivalent à 0,1 % de la population mondiale, gère alors 3 % des réserves en eaux douces renouvelables de la planète qui sont concentrées principalement dans le bassin hydrographique du Saint-Laurent (40 %). Cette grande ressource en eau

amène de grandes responsabilités de conservation et de protection afin de préserver ce privilège pour les générations futures. Une loi a été adoptée à l'unanimité lors de l'Assemblée nationale le 11 juin 2009 afin de garder le caractère collectif des ressources en eau et d'en renforcer leur protection (Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs du Québec, MDDEFP). Pourtant, cette abondance de ressource a mené inévitablement à une surconsommation de l'or bleu à tous les niveaux. Une grande partie de cette eau renouvelable sert à la production hydro-électrique et il ne fait nul doute que la diminution de la disponibilité de cette ressource pourrait devenir problématique.

C'est le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) qui gère le régime hydrique de la province au niveau de la sécurité, de l'équité et le tout, dans un esprit de développement durable. Selon le site du CEHQ, le centre « assure la régularisation du régime des eaux par l'exploitation des barrages publics, la gestion foncière du domaine hydrique de l'État et le maintien de son intégrité, et il veille à la sécurité des barrages. [...] De manière plus générale, il acquiert les connaissances hydrologiques et hydrauliques dont le MDDEFP a besoin pour assurer la gestion de l'eau et l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur le régime hydrique ».

### **1.1.3 Les barrages, les réservoirs et les digues**

Comme mentionné dans la section précédente, le Québec déborde de ressources hydriques ce qui favorise l'implantation d'ouvrages de retenue d'eau, comme les barrages et les digues, bien que la disponibilité de l'eau varie selon les saisons et les régions. Dans le dernier siècle, de nombreuses constructions de barrages ont vu le jour, au Québec et ailleurs dans le monde, afin de mieux contrôler les débits des rivières, mais surtout les crues en aval. Le contrôle des débits permet de diminuer l'intensité et la fréquence des inondations (crues) et de garantir un débit minimum (débit réservé) lors de période de sécheresse, ce qui a pour but de protéger les écosystèmes. L'irrigation des terres, la production d'électricité, le récréotourisme et l'alimentation en eau sont aussi d'autres fonctions des barrages.

En raison de l'abondance de la ressource, l'hydroélectricité s'impose vers la fin du 19<sup>e</sup> siècle et le début du 20<sup>e</sup> siècle et se révéla alors très prometteuse vis-à-vis les autres formes d'énergie. Les besoins en électricité se faisant de plus en plus grands, autant dans les milieux domestiques qu'industriels, la construction de nouvelles infrastructures s'imposa à travers le monde. À ce jour, près de la moitié des grands fleuves du monde comptent au moins un grand barrage et l'apogée de la construction de ces ouvrages remonte aux années 1970 (World commission dams, WCD<sup>6</sup> 2000). Selon ce rapport, le Canada se classait au 1<sup>er</sup> rang en termes de production d'énergie hydroélectrique. Les conditions géographiques (dénivelés) et climatiques (pluies abondantes) du Québec sont propices au bon développement de ces types d'infrastructures, les réservoirs, les barrages et les digues sont abondants et occasionnent divers impacts dans leur milieu. Selon le ministère des Ressources naturelles et de la Faune, la production totale d'électricité disponible au Québec était de 228,3 TWh en 2008 et près de 98 % de cette production était de source renouvelable provenant des forces hydrauliques du Québec. La province se classait à ce moment 3<sup>e</sup> dans le monde, en termes de pourcentage de sa production renouvelable d'électricité, derrière la Norvège (99,5 %) et l'Islande (99,9 %). D'un autre côté, la gestion des barrages-réservoirs est encore aujourd'hui problématique, car ces infrastructures apportent d'importantes modifications environnementales comme la détérioration de la qualité de l'eau, l'érosion des berges et la modification des niveaux d'eau.

#### **1.1.4 L'hydro-électricité au Québec**

Grâce à la grande disponibilité de l'eau au Québec, l'hydroélectricité est rapidement devenue la principale source d'énergie dans cette province. La mise en place du réseau hydroélectrique s'est faite en plusieurs étapes au cours des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles. Voici un bref historique de l'hydroélectricité au Québec d'après le site d'Hydro-Québec (HQ). La première phase, « Le développement anarchique d'une industrie » couvre les années 1878 à 1929. C'est en 1878 que l'éclairage électrique fit

---

<sup>6</sup> Rapport de la commission des barrages publié en novembre 2000.

son entrée à travers le monde. Cette nouvelle source d'énergie était, dès à présent, compétitrice avec le gaz. Quelques entreprises virent le jour au Québec comme la Montréal Light, Heat and Power Compagny et la Shawinigan Water and Power Company. Le choix de prendre comme source d'énergie l'hydroélectricité a donc eu un effet irrévocable sur l'industrialisation du territoire et sur la mise en valeur des ressources forestières et minières du Québec. « La marche vers l'Étatisation » est la deuxième phase qui s'étend de 1930 à 1944. Malgré la prospérité des entreprises hydroélectriques, celles-ci ne font pas belle image auprès des Québécois, car leurs tarifs sont très élevés et leurs services de mauvaise qualité. C'est en 1944 que la société d'État, Hydro-Québec, voit le jour après l'expropriation des actifs électriques et gaziers par le premier ministre Adélard Godbout. Viennent ensuite « Les premières réussites d'Hydro-Québec » de 1945 à 1959. L'après-guerre est caractérisée par une grande prospérité économique ce qui a grandement encouragé la demande en électricité. L'amélioration du service de distribution et la fiabilité du réseau étaient de grands défis pour la nouvelle société d'État. L'aménagement de barrages relativement éloignés a permis à Hydro-Québec de compléter son expertise et d'élargir son champ d'action. Les régions rurales ont maintenant accès au réseau électrique.

« Les grands défis (1960-1979) » est l'étape qui caractérise la nationalisation de l'hydro-électricité au Québec. Les rivières qui étaient encore non concédées à des intérêts privés ont été confiées à Hydro-Québec, par le gouvernement libéral, afin de faire leur aménagement et leur exploitation. Ce n'est qu'en 1963 que les distributeurs privés d'électricité commencèrent à être acquis par Hydro-Québec. Afin de répondre à une demande croissante d'électricité, Hydro-Québec a construit plusieurs complexes hydroélectriques qui doubleront sa capacité de production tous les dix ans. La cinquième phase « À la recherche d'un nouveau souffle » vient conséquemment au choc pétrolier de 1979, l'industrie hydroélectrique connut une période plus sombre où la demande sera de moins en moins forte. Quelques années plus tard, vers 1990, la demande recommence à augmenter et Hydro-Québec relance son programme de construction. La société d'État mise aussi sur la promotion de l'efficacité et l'économie énergétiques. Finalement, la dernière phase « Une nouvelle dynamique de développement » est caractérisée par un

élargissement du marché de l'hydro-électricité à travers l'Amérique du Nord où celui-ci devient compétitif vers 1997. Hydro-Québec en fait maintenant partie. Ces nouvelles transactions permettent un enrichissement collectif du Québec (HQ, 2012, <http://www.hydroquebec.com/comprendre/histoire/>, page consultée le 1<sup>er</sup> février 2012).

#### ***1.1.4.1 Les barrages et le climat***

Étant donné l'omniprésence de l'hydro-électricité au Québec, le territoire est sans contredit plus sensible aux changements climatiques en raison de son lien direct avec le climat. Selon Ouranos, l'hydro-électricité fournit 94 % de l'approvisionnement en électricité du Québec et est totalement tributaire des précipitations sous forme de pluie et de neige. En effet, les besoins en chauffage et en climatisation seront influencés par les fluctuations climatiques ce qui aura des conséquences directes sur l'économie québécoise. De plus, les infrastructures hydro-électriques du Québec ayant été conçues en fonction des composantes hydriques actuelles pourraient se voir affectées par les changements climatiques futurs (Baltas et al., 1997).

Dans un contexte actuel de réchauffement climatique, une prédiction de la variabilité des débits en aval des barrages devient de plus en plus pertinente. Les modèles hydrologiques sont fréquemment utilisés dans le but de prédire les débits des rivières non régularisées, mais qu'en est-il des rivières régularisées par les barrages? Étant donné la présence de réservoirs d'eau de surface, l'évapotranspiration causée par la chaude température viendra certainement modifier la quantité d'eau disponible en amont des barrages. Ces modifications climatiques viendront-elles influencer les crues en aval des barrages?

#### **1.1.5 Impacts environnementaux des barrages**

Toutefois, la construction de barrages n'a pas apporté que des effets positifs. Plusieurs controverses, entre autres sur le plan environnemental, ont été et sont toujours au cœur du sujet au Québec. Lors de la construction des premiers barrages, peu d'études

sur les impacts environnementaux provoqués par ces barrages et réservoirs ont été réalisées. Évidemment, les préoccupations environnementales avant les années 70 n'étaient pas aussi présentes que de nos jours. Il est donc primordial d'effectuer des études indépendantes sur les impacts environnementaux qu'apportent les barrages au Québec afin de pallier cette lacune. C'est dans cette optique que s'est inscrit le programme de recherche élaboré par le professeur de l'Université du Québec à Trois-Rivières, Ali A. Assani.

## **1.2 La problématique – Revue de littérature**

Le programme de recherche sur l'impact des barrages comporte trois phases. La première phase quantifie les impacts des barrages sur les caractéristiques des débits. La deuxième phase étudie les impacts de ces changements hydrologiques sur les composantes abiotiques. Finalement, la dernière phase étudie les impacts des changements hydrologiques sur les composantes biotiques soit la faune et la flore.

De nombreuses études ont déjà été consacrées aux impacts des barrages sur les régimes hydrologiques des rivières (p. ex. Assani et al., 2002, 2005, 2006, 2007; Lajoie et al., 2007; Magilligan and Nislow, 2005; Matteau et al., 2009; Pyron and Neuman et al., 2008). La plupart de ces travaux se sont intéressés aux impacts des barrages sur la variabilité spatiale des débits. Ainsi, au Québec, les travaux réalisés sur ce thème ont permis de mettre en évidence trois types d'impacts hydrologiques correspondant chacun à un mode de gestion des barrages spécifiques. Il s'agit d'impact de type inversion, homogénéisation et naturel. De ces trois régimes, les régimes d'inversion et de type naturel sont les plus courants au Québec (Figure 1.1). Chacun de ces deux régimes représente 40 % de la totalité des barrages québécois. Il ressort de ces travaux que l'inversion du cycle naturel des débits constitue le changement hydrologique le plus profond induit par les barrages au Québec.

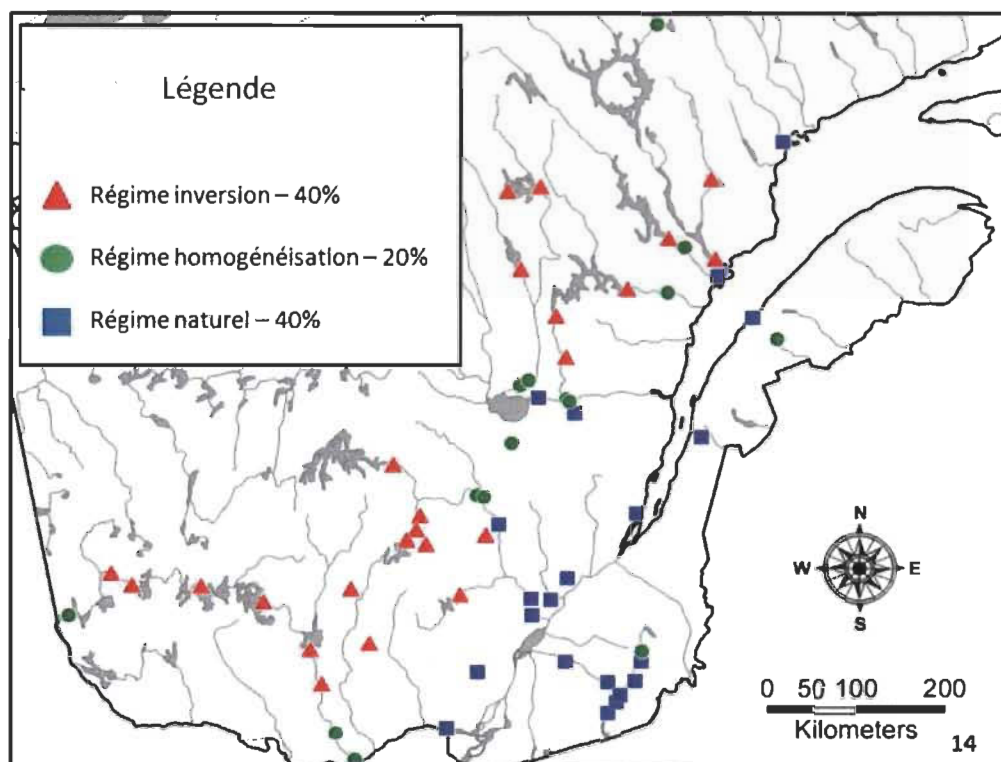


Figure 1.1 Distribution spatiale des trois types de régime hydrologique au Québec.

### 1.2.1 Types de régimes hydrologiques régularisés

#### 1.2.1.1 Régime hydrologique régularisé de type inversion

Le régime d'inversion est celui qui perturbe le plus profondément les caractéristiques fondamentales des débits des cours d'eau : la période d'occurrence, la durée, la fréquence et la magnitude. L'occurrence des débits maximums est en hiver et celle des débits minimums est au printemps, au moment de la fonte de neige, ce qui est complètement l'inverse du régime naturel (Figure 1.2). Il se produit alors une inversion du cycle hydrologique naturel des débits. De plus, la variabilité des débits est plus importante par rapport aux rivières naturelles et la magnitude diminue.

#### ***1.2.1.2 Régime hydrologique régularisé de type homogénéisation***

Ce régime est caractérisé par la faible variabilité intermensuelle de ses débits, ce qui les rend pratiquement égaux tout au long de l'année (Figure 1.2).

#### ***1.2.1.3 Régime hydrologique régularisé de type naturel***

Le régime de type naturel s'apparente à celui des rivières naturelles (non régularisées), mais il est régularisé tout au long de l'année. Il s'en différencie par une tendance à la baisse des débits en hiver et par une tendance à la hausse des débits au printemps. Ce régime conserve un cycle hydrologique naturel contrairement aux deux régimes hydrologiques précédents (Figure 1.2).



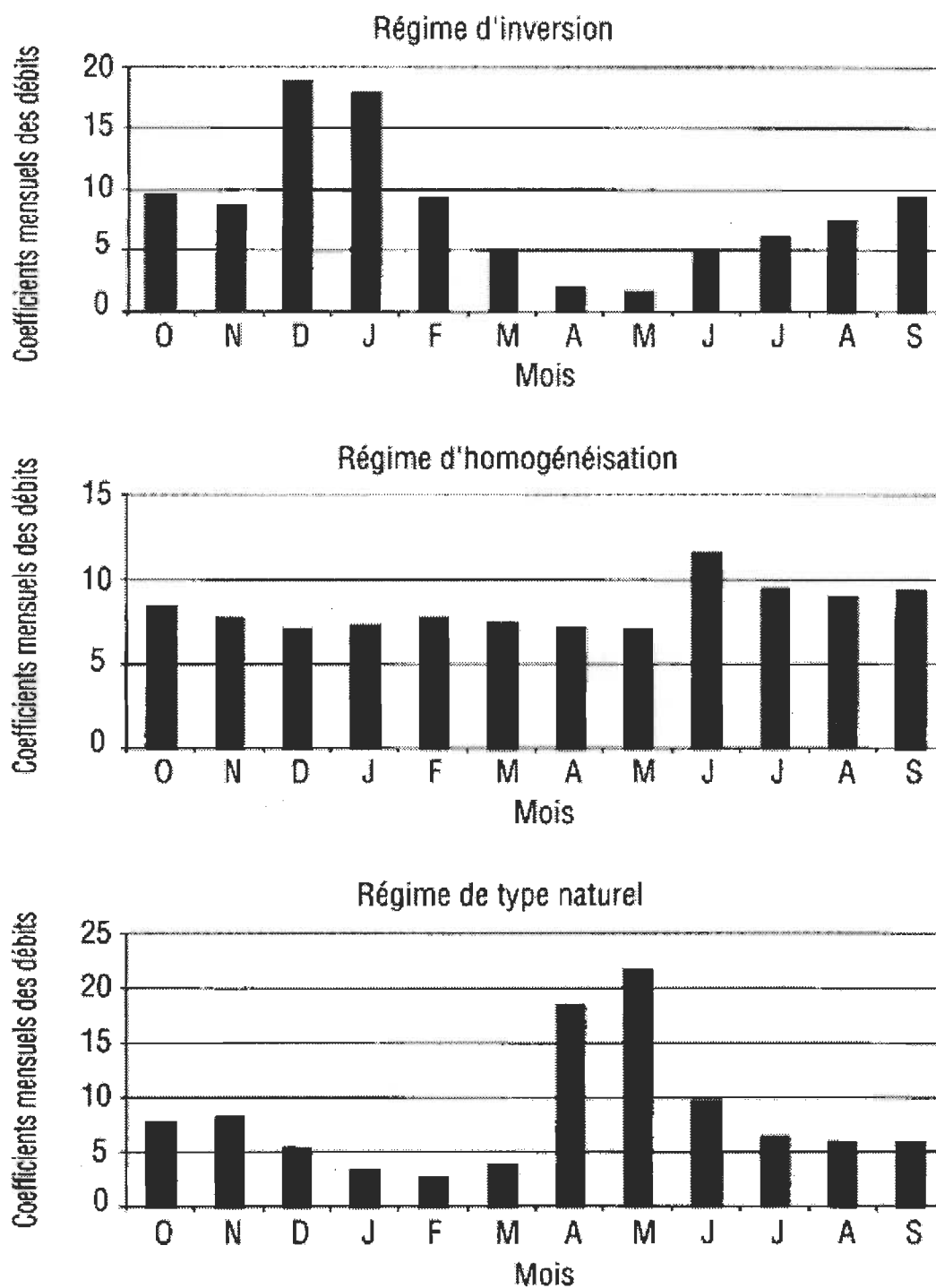


Figure 1.2 Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits.

### 1.2.2 La controverse

La différenciation de ces trois types de régimes hydrologiques implique donc l'existence de différents impacts hydrologiques associés aux différents modes de gestion des barrages. La quantification de ces impacts sur les composantes abiotiques et biotiques sera alors influencée par les modes de gestion des barrages. Par ailleurs, quelques études se sont intéressées aux facteurs qui influencent la variabilité interannuelle des débits extrêmes en aval de ces infrastructures (p. ex. Hotchkiss et al., 2000; Lopez-Moreno et al., 2009; Villarini et Smith, 2010; Fortier et al., 2011; Villarini et al., 2011a, 2011b). Ces études visaient toutes à répondre à la question fondamentale suivante: quel est l'effet (direct ou indirect) du climat sur la variabilité interannuelle des débits extrêmes en aval des barrages?

Une étude portant sur les débits extrêmes des rivières régularisées par les barrages aux États-Unis (Poff et al., 2007) conclut que le climat n'avait aucune influence sur la variabilité interannuelle des débits extrêmes et que cette variabilité des débits dépendrait exclusivement du mode de gestion des barrages. On ne pourrait donc pas prédire les effets du réchauffement climatique sur la variabilité interannuelle des débits en aval des barrages. De plus, il en résulterait une homogénéisation des débits en aval indépendamment des conditions climatiques qui varient d'un bassin versant à un autre. Plusieurs autres études ont corroboré ces résultats (p. ex. Hotchkiss et al., 2000; Moyle et Mount, 2007; Lopez-Moreno et al., 2009; Fortier et al., 2011).

Malgré ces études, ce sujet reste controversé puisque d'autres études ont mis en évidence l'influence du climat sur la variabilité interannuelle des débits en aval des barrages (p. ex. Assani et al., 2011, 2012; Jay and Naik, 2011; Naik and Jay, 2011a, 2011b; St-Jacques et al., 2010; Zhao et al., 2012). Cette influence du climat implique que l'on pourrait prédire la variabilité des débits en aval des barrages au moyen des modèles hydrologiques et climatiques dans le contexte du réchauffement climatique actuel.

La confrontation de ces travaux soulève quatre types de problèmes.

- Certaines études analysent l'influence du climat sur la variabilité spatiale des débits en aval des barrages (p. ex. Poff et al., 2007) alors que d'autres études analysent cette influence du climat sur la variabilité temporelle des débits (p. ex. Assani et al., 2011). Les conclusions de ces études ne peuvent donc pas être comparées.
- Certaines études analysent l'influence du climat sur les débits journaliers (p. ex. Poff et al., 2007) alors que d'autres analysent cette influence sur les débits saisonniers et/ou annuels (p. ex. Assani et al., 2011). Or, la relation entre le climat et les débits peut être influencée par l'échelle d'analyse.
- Les méthodes d'analyse de la relation entre les variables climatiques et les débits en aval des barrages varient d'une étude à une autre, ce qui peut conduire à des conclusions différentes.
- Il n'existe encore aucune étude sur les impacts de modes de gestion de crues sur la relation entre les débits et le climat en aval des barrages. Ces crues sont les principales responsables de la variabilité interannuelle des débits aussi bien en rivières naturelles qu'en aval des barrages.

### **1.3 Objectifs et hypothèses de l'étude**

À la lumière de ces considérations, l'objectif de cette étude est d'analyser les impacts de modes de gestion des crues saisonnières sur la relation entre le climat et les débits en aval de deux types de barrages caractérisés par des modes de gestion des crues différentes. Les deux hypothèses de cette étude sont les suivantes :

1. Le mode de gestion de crues saisonnières est le principal facteur influençant la relation entre les débits et le climat en aval des barrages. De fait, les crues, en particulier les crues saisonnières, sont les plus directement influencées par les variations climatiques à l'échelle saisonnière.

2. La relation entre le climat et la magnitude des débits maximums extrêmes saisonniers en aval des barrages dépend de l'ampleur des changements affectant les régimes de crues ainsi que de l'échelle d'analyse des débits (jour, mois, saison, année).

## **MÉTHODOLOGIE**

### **1.4 Description des bassins versants et méthodes d'analyse de données**

Dans le cadre de cette étude, en tenant compte de la disponibilité des données des débits journaliers sur une période relativement longue mesurées simultanément en rivières naturelles et en aval des barrages, on a choisi les deux bassins versants suivants : le bassin versant de la rivière Matawin et celui de l'Assomption. Étant donné que les données hydrologiques et climatiques pour une rivière caractérisée par un régime d'écoulement homogénéisé n'étaient pas disponibles, seule une comparaison des régimes de type inversion et de type naturel a été faite. Ces deux types de régimes étant diamétralement opposés, cette approche est alors suffisante pour démontrer l'effet du mode de gestion du barrage sur la variabilité interannuelle des débits extrêmes en aval des barrages. Comme chaque mode de gestion induit un régime hydrologique régularisé spécifique en aval des barrages (Assani et al., 2005, 2006; Lajoie et al., 2007; Matteau et al., 2009), l'analyse d'un grand nombre de bassins versants ne semble pas être nécessaire.

Dans le premier bassin versant, on a érigé un barrage sur le cours même de la rivière Matawin en 1930. Ce barrage a induit un régime de type inversion (Assani et al., 2002). La rivière Matawin draine un bassin versant de 5770 km<sup>2</sup> et est typique des rivières du Bouclier canadien caractérisées par une alternance quasi régulière de biefs sableux et caillouteux. Le climat est de type subpolaire continental avec une lame d'eau annuelle d'environ 1000 mm et une température moyenne annuelle de 4 °C. Enfin, sur le plan de l'affectation du sol, aucune activité agricole n'est pratiquée dans ce bassin

versant en raison des sols peu fertiles et du climat subpolaire. Depuis la construction du réservoir, les activités anthropiques se limitent à l'exploitation forestière, le bassin versant n'a donc connu aucun changement majeur ce qui permet de déterminer l'influence éventuelle du climat sur la variabilité interannuelle des débits (Ouarda et al., 1999). En 1929, la Shawinigan Water & Power Company a construit sur la rivière Matawin, le réservoir Taureau. Celui-ci avait trois objectifs, soit, premièrement, rehausser la capacité hivernale des réservoirs des centrales hydroélectriques de Grand-Mère, Shawinigan 2 et 3 et la Gabelle, érigées sur la rivière Saint-Maurice. Deuxièmement, lutter contre les inondations sur cette même rivière et enfin, faciliter l'évacuation des billes de bois provenant de l'amont. Dans les années 1960, à la suite de la nationalisation du secteur énergétique par le gouvernement du Québec, Hydro-Québec a pris le contrôle du réservoir (Fortier et al., 2011). Le réservoir Taureau (barrage Matawin) est un réservoir de type annuel, ce qui signifie que son remplissage complet se fait chaque année et résulte exclusivement de l'apport en eau provenant de son bassin versant. C'est à partir de la mi-novembre que s'amorce la vidange du réservoir qui se poursuit durant toute la saison hivernale pour combler, entre autres, les besoins en hydro-électricité. De forts débits sont maintenus à la sortie du barrage afin de créer un chenal sur la rivière Matawin libre de tout couvert de glace durant cette période et ainsi éviter la formation d'embâcles en aval.

Les débits sont mesurés à deux endroits soit en amont, à la station de Saint-Michel-des-Saints (la superficie du bassin versant est de 1390 km<sup>2</sup> au niveau de la station) non influencée par le barrage (Ouarda et al., 1999) et immédiatement en aval du réservoir (la superficie du bassin versant est de 4070 km<sup>2</sup>). Les données de températures et de précipitations du bassin versant de la rivière Matawin ont été mesurées au niveau du barrage de 1925 à 1982 et à la station Saint-Michel-des-Saints depuis 1962. Comme le coefficient de corrélation entre les variables climatiques mesurées aux deux stations pendant l'intervalle où la collecte de données se chevauche est supérieur à 0,90, une longue série de variables climatiques (1930-2008) a été créée en fusionnant les données des deux stations. Les variables climatiques ont également été prises à partir d'un site web d'Environnement Canada à la même date que les données de débits

[http://climat.meteo.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricData\\_f.html](http://climat.meteo.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricData_f.html), page consultée en mars 2009). Toutefois, les données journalières de débits lâchés en aval de ce réservoir après 1994 nous ont été communiquées aimablement par Hydro-Québec, car elles ne sont plus archivées par Environnement Canada.

Quant à la rivière L'Assomption, elle draine une superficie totale de 4220 km<sup>2</sup> avant de se jeter dans le fleuve Saint-Laurent en aval de la ville de Montréal. Les deux tiers de la superficie du bassin versant de la rivière l'Assomption s'étendent sur le Bouclier Canadien et le tiers, sur les basses terres du Saint-Laurent. L'agriculture intensive est principalement pratiquée dans les basses terres du St-Laurent. Cette dernière formation géologique est constituée principalement des dépôts sédimentaires meubles. De plus, aucun barrage hydroélectrique n'a été construit sur le cours même de la rivière l'Assomption. Néanmoins, deux barrages hydroélectriques furent érigés sur son affluent principal, la Ouareau : les barrages de Rawdon et de Crabtree. Pour la rivière Ouareau (1687 km<sup>2</sup>), les données de débits en aval du barrage de Rawdon (1260 km<sup>2</sup>) ont été mesurées depuis 1919. Le barrage de Rawdon fut construit en 1911 pour la production de l'énergie hydroélectrique. Il a été érigé au pied du Bouclier Canadien (zone de contact du Bouclier Canadien et des Basses Terres de Saint-Laurent). Les deux barrages induisent un régime hydrologique régularisé de type naturel en aval. Ainsi, les débits maximums surviennent au printemps au moment de la fonte de neige et les débits minimums en hiver. Ce régime est donc comparable à celui de la rivière l'Assomption. Sur cette dernière rivière, les variables climatiques (température et précipitations) et les débits sont mesurés de manière continue à la station de Joliette (1340 km<sup>2</sup>) respectivement depuis 1913 et 1925.

Dans chaque bassin versant et à chacune des stations de mesure des débits, on a constitué une série hydrologique composée des valeurs des débits extrêmes maximums journaliers les plus élevés mesurés chaque année au cours d'une saison (crue saisonnière) et leurs dates d'occurrence. Pour vérifier l'influence de l'échelle d'analyse sur la relation entre les variables climatiques et les débits, on a constitué des séries hydrologiques des moyennes saisonnières et annuelles des débits dans les deux bassins

versants. On a aussi constitué des séries climatiques de la température (maximum et minimum) et des précipitations (pluie, neige et précipitations totales). Les séries de température ont été déduites des moyennes des températures extrêmes journalières saisonnières et celles de précipitations, par des totaux de la quantité de neige et/ou de pluies saisonnières. Les douze mois de l'année ont été regroupés en quatre saisons : hiver (janvier à mars), printemps (avril à juin), été (juillet à septembre) et, enfin, automne (d'octobre à décembre). Pour déterminer l'influence des barrages sur la gestion des crues saisonnières, on a comparé les dates d'occurrence de ces crues observées en site naturel et en aval du barrage au moyen des hydrogrammes de crues (variation des débits journaliers en fonction de temps). Cette comparaison a été effectuée pendant la période 1930 à 2008. Elle a été fondée exclusivement sur le synchronisme dans l'occurrence des crues saisonnière en rivières naturelles et en aval des barrages en relation avec les épisodes de pluies et/ou de fonte de neige. Rappelons qu'une crue saisonnière est celle qui génère le débit le plus élevé mesuré au cours d'une saison donnée. En condition naturelle, la crue saisonnière est généralement générée par des épisodes de pluies et/ou de fonte de neige abondants durant la saison. Cette comparaison a permis d'identifier quatre types de crues saisonnières en aval des barrages. Puis, on a comparé leur fréquence dans les deux bassins versants pour chacune des quatre saisons. La magnitude des crues saisonnières mesurée en sites naturels et en aval des barrages a été corrélée aux variables climatiques afin de déterminer l'influence du climat sur les débits aux échelles journalières, saisonnières et annuelles. Cette corrélation a été effectuée après l'analyse de la stationnarité débits maximums journaliers saisonniers au moyen de la méthode de Lombard pour les quatre stations hydrométriques (amont et aval des barrages dans les deux bassins versants). Cette méthode a été déjà décrite abondamment dans la littérature scientifique (p. ex. Assani et al., 2011, 2012; Lombard, 1987; Quessy et al., 2011). Il convient de mentionner que toutes ces étapes méthodologiques sont décrites en détail dans l'article qui constitue le chapitre II de ce mémoire.

## RÉSULTATS ET CONCLUSION

En ce qui concerne les modes de gestion des crues saisonnières, on a observé quatre types de modes :

- Le mode de gestion de Type A est caractérisé par l'occurrence synchrone de la crue saisonnière en amont et en aval des barrages.
- Le mode de gestion de type B est caractérisé par l'absence de synchronisme dans l'occurrence de la crue saisonnière en amont et en aval du barrage.
- Le mode de gestion de type C est caractérisé par l'occurrence seulement de la crue saisonnière en site naturel (en amont du barrage). Cette crue est absente en aval du barrage.
- Le mode de gestion de type D est l'inverse du précédent, c'est-à-dire que la crue saisonnière se produit en aval du barrage seulement sans qu'elle soit associée à une crue en amont du barrage.

La comparaison des fréquences de ces quatre types de crues a révélé que les crues de type C et D sont plus fréquentes en aval du barrage Matawin (mode de gestion de type inversé) qu'en aval du barrage de Rawdon (mode de gestion de type naturel). Cette fréquence est plus élevée en hiver et en automne qu'au printemps et en été. L'analyse de la stationnarité des débits maximums journaliers saisonniers, associés aux crues saisonnières, a révélé que la variabilité temporelle de ces débits est caractérisée par une diminution de la moyenne à long terme dans le temps en aval du barrage de Matawin, caractérisé par un mode de gestion de type inversé, alors qu'en amont de ce barrage, la moyenne de ces débits augmente significativement dans le temps. En revanche, dans le bassin versant de la rivière l'Assomption, aucune différence ne fut observée en aval du barrage Rawdon et en site naturel. Enfin, l'analyse de corrélations entre les débits maximums journaliers saisonniers et les variables climatiques (température et climat) a



révélé une corrélation significative entre les deux variables à toutes les échelles d'analyse (journalière saisonnière et annuelle) dans le bassin versant de la rivière l'Assomption aussi bien en aval du barrage Rawdon qu'en site naturel. En revanche, dans le bassin versant de la rivière Matawin, en aval du barrage, aucune corrélation significative entre les variables ne fut observée à l'échelle journalière. À l'échelle saisonnière, la corrélation a été observée au printemps et en automne seulement. Elle fut significative à l'échelle annuelle.

En guise de conclusion, la relation entre les variables climatiques et les débits maximums journaliers saisonniers en aval des barrages dépend de deux facteurs : le type de mode de gestion de crues et l'échelle d'analyse. Plus la fréquence des crues artificielles est grande (type D), moins les débits sont significativement corrélés aux variables climatiques. Cette absence de corrélation s'estompe progressivement de l'échelle journalière à l'échelle annuelle.

## **CHAPITRE II**

### **THE MANAGEMENT MODES OF SEASONAL FLOODS AND THEIR IMPACT ON THE RELATIONSHIP BETWEEN CLIMATE AND STREAMFLOW DOWNSTREAM FROM DAMS IN QUEBEC (CANADA)**

Raphaelle Landry, Ali A. Assani, Stacey Biron, Jean-François Quessy

(Publié dans la revue river research and applications, 2013)

**The management modes of seasonal floods and their impact on the relationship between climate and streamflow downstream from dams in Quebec (Canada)**

River research and applications  
River Res. Applic. (2013)  
Published online in Wiley Online Library  
(wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/rra.2644

R. LANDRY a, A. A. ASSANI a\*, S. BIRON a AND J.-F. QUESSY b

a Département des sciences de l'Environnement, Centre de recherche sur les interactions bassins versants-écosystèmes aquatiques (RIVE) et Groupe de Recherche interuniversitaire en Limnologie et en Environnement aquatique (GRIL), Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351 Boulevard des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada

b Département de Mathématiques et d'Informatique (Department of Mathematics and Computer Science), Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec, Canada

\*Correspondence to: A. A. Assani, Département des sciences de l'Environnement, Centre de recherche sur les interactions bassins versants-écosystèmes aquatiques (RIVE) et Groupe de Recherche interuniversitaire en Limnologie et en Environnement aquatique (GRIL), Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351 Boulevard Des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

E-mail: [Ali.Assani@uqtr.ca](mailto:Ali.Assani@uqtr.ca)

**ABSTRACT**

The goal of the study was to compare the modes of management of seasonal floods for different dams and to constrain their impact on the relationship between climate variables and streamflow downstream from the dams. At the Rawdon dam, downstream from which the Ouareau River is characterized by a natural-type regulated flow regime, a 'type A' flood management mode prevails, in which the same rainfall and/or snowmelt events account for seasonal floods both in the unregulated (natural) stretch of river upstream from the dam and in the river downstream from the dam. As a result, seasonal floods in the natural setting and downstream from the dam are nearly synchronous. In contrast, downstream from the Matawin dam (Matawin River), which produces an inversion-type regulated flow regime, the prevalent flood management modes are of types B and D, whereby seasonal floods observed upstream and downstream from the dam are not caused by the same rainfall and/or snowmelt events and, as a result, are not synchronous. This difference in seasonal flood management modes affects the interannual variability of the magnitude of seasonal daily maximum flows related to the seasonal floods. Thus, the interannual variability of these flows downstream from the Matawin dam differs significantly from that of flows upstream. No correlation is observed between climate variables and streamflow downstream from the Matawin dam. This absence of correlation disappears gradually at the annual scale, at which streamflow is correlated with rainfall, as is observed upstream from the dam.

Copyright © 2013 John Wiley & Sons, Ltd.

**KEY WORDS:** daily extreme flows; flood management mode; temperature; precipitation; dams; Quebec

Received 4 September 2012; Revised 19 December 2012; Accepted 3 January 2013

## INTRODUCTION

Although many studies have looked at the hydrologic impacts of dams, few to date have focused on the factors affecting the interannual variability of extreme flows downstream from these structures (e.g. Hotchkiss et al., 2000; López-Moreno et al., 2009; Villarini and Smith, 2010; Fortier et al., 2011; Villarini et al., 2011a, 2011b). These studies all aim to address the following basic question: what is the effect (direct or indirect) of climate on the interannual variability of extreme flows downstream from dams? In an extensive study focused on extreme flows in rivers regulated by dams in the United States, Poff et al. (2007) concluded that the variability of these extreme flows is independent from that of climate but, instead, depends exclusively on the dams. Thus, these authors proposed that ‘dams have the potential to reduce (. . .) natural regional (river’s natural disturbance regime) and thus impose environmental homogeneity across broad geographic scales’. Several other studies corroborated these results (e.g. Hotchkiss et al., 2000; López-Moreno et al., 2009; Fortier et al., 2011). This topic, however, remains controversial because other studies have highlighted the effect of climate on the spatiotemporal variability of streamflow downstream from dams (e.g. Naik and Jay, 2011a, 2011b; St-Jacques et al., 2010; Assani et al., 2011, 2012; Jay and Naik, 2011; Zhao et al., 2012). However, a review of all these studies did raise four types of problems:

- Some studies look at the effect of climate on the spatial variability of streamflow downstream from dams (e.g. Poff et al., 2007), whereas others look at the effect of climate on the temporal variability of flows (e.g. Assani et al., 2011). As such, their conclusions cannot be compared.
- Some studies look at the effect of climate on daily flows (e.g. Poff et al., 2007), and others look at the effect of climate on seasonal and/or annual flows (e.g. Assani et al., 2011). This is problematic because the scale of analysis can affect the relationship between climate and streamflow.

- Methods used to analyse the relationship between climate variables and streamflow downstream from dams may differ from one study to another, which may undoubtedly lead to differing conclusions.
- There have been no study yet of the impact of flood management mode on the relationship between streamflow downstream from dams and climate, even though floods are the main factor affecting the interannual variability of streamflow both in natural rivers and downstream from dams.

Given the foregoing, the goal of this study is to look at the impact of seasonal flood management mode on the relationship between climate and streamflow downstream from two types of dams characterized by different flood management modes. The two underlying hypotheses to be tested are the following:

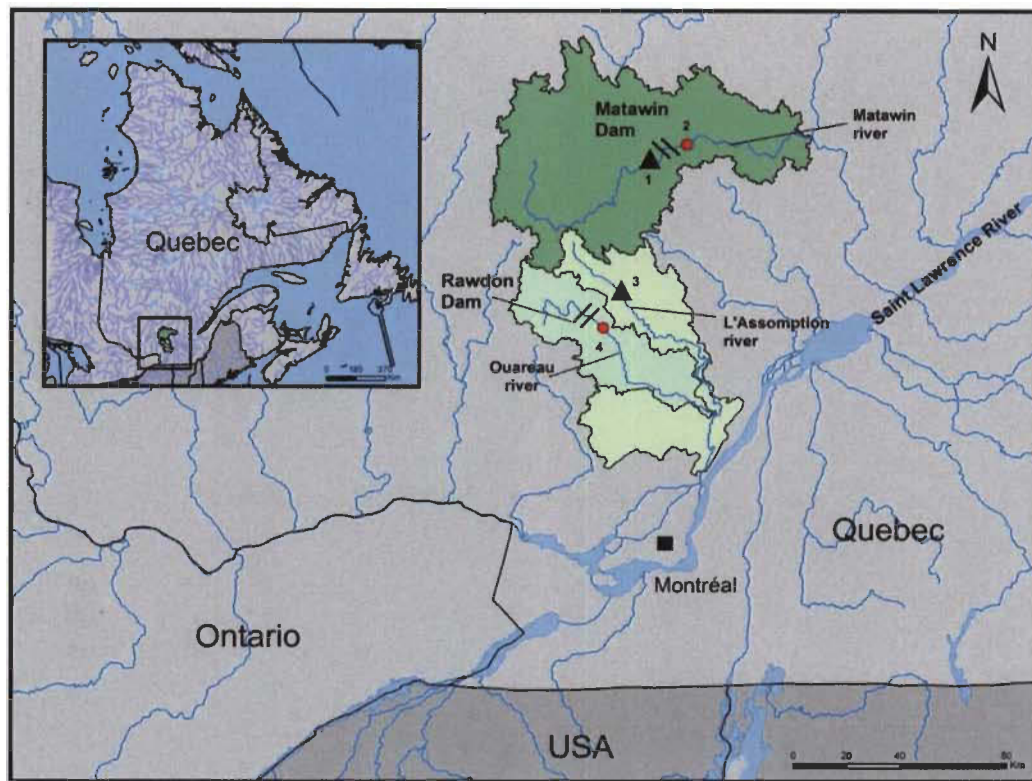
- (1) The mode of management of seasonal floods is the main factor affecting the relationship between climate and streamflow downstream from dams. In fact, floods, particularly seasonal floods, are most directly affected by seasonal scale climate variations.
- (2) The relationship between climate and the magnitude of seasonal extreme maximum flows downstream from dams depends on the extent of changes affecting flood regimes, on one hand, and on the scale of streamflow analysis (daily, monthly, seasonal or annual) on the other.

## **METHODS**

### ***Choice of the watershed, watershed description and choice of stations***

Three types of regulated hydrologic regimes occurring downstream from dams have been identified and described in Quebec (Assani et al., 2005, 2006, 2007; Lajoie et al., 2007, Matteau et al., 2009): inverted, homogenized and natural-type. Each of these

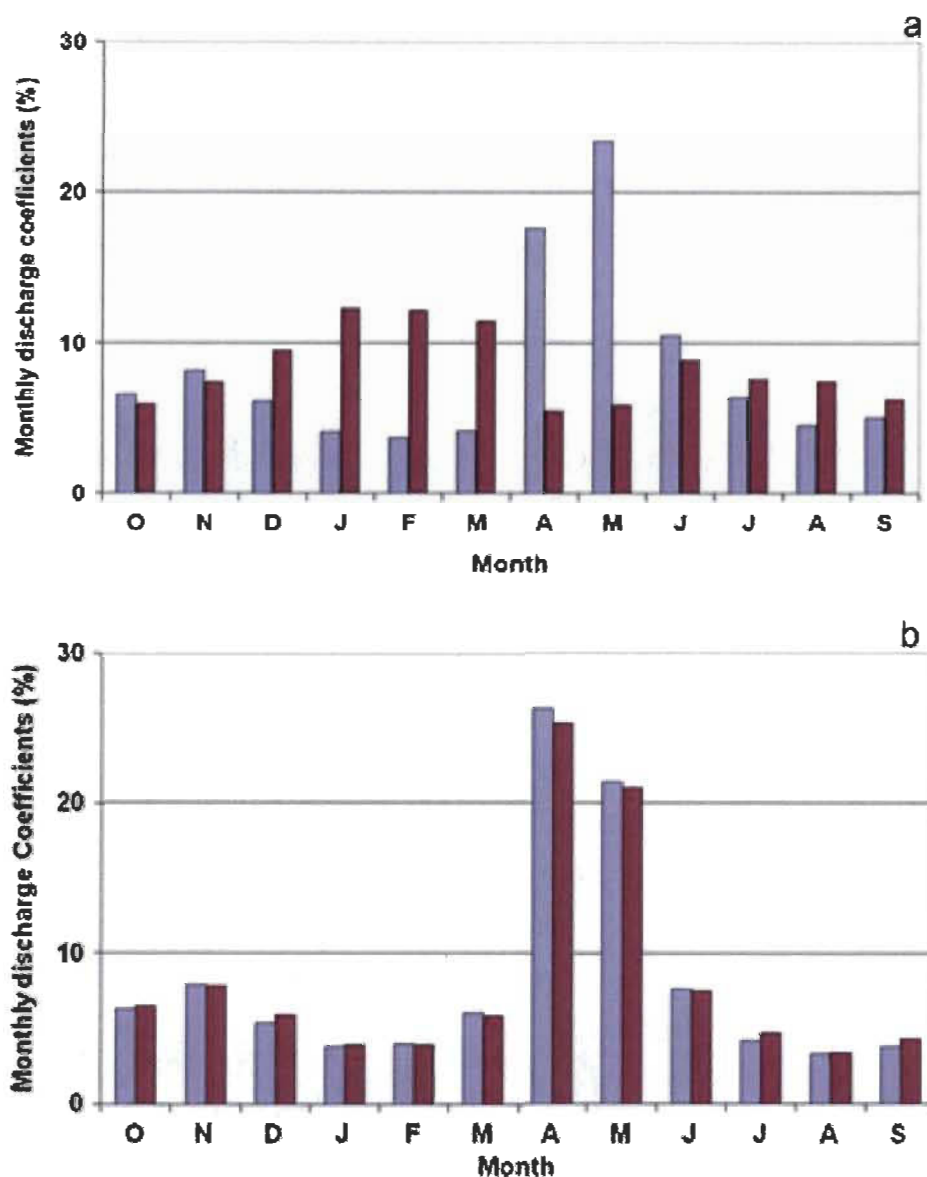
hydrologic regimes corresponds to a specific dam management mode. The inverted regime is characterized by minimum flows in spring during snowmelt and maximum flows in winter, which is opposite to the flow regime observed in natural rivers. The homogenized hydrologic regime is characterized by low intermonthly flow variability, with flow remaining nearly constant throughout the year. Finally, the natural-type regime is similar to that of natural rivers (maximum flows in spring and minimum flows in winter) but shows a slight increase in flow in winter and a slight decrease in spring. In Quebec, inversion and natural type regimes are the most common, each representing 40% of the dams. As each management mode corresponding with a given regulated hydrologic regime produces the same hydrologic effects (see Assani et al., 2005; 2006; Lajoie et al., 2007; Matteau et al., 2009), analysis of a large number of watersheds does not seem to be necessary. Furthermore, because of the scarcity of hydrologic data measured over relatively long periods, the study only looked at three watersheds, namely those of the Matawin, L'Assomption and Ouareau rivers (Figure 2.1). The Matawin river is characterized by an inversion-type regulated regime, the hydrologic cycle downstream from the Matawin dam being inverted relative to that upstream from the dam, as shown in Figure 2-2a. As for the Ouareau River, streamflow is regulated by the Rawdon and Crabtree dams. Because data on streamflow upstream from the Rawdon dam were not available, flow data measured at the station nearest to Joliette on the L'Assomption River were used. Figure 2-2b shows that the annual hydrologic cycle of monthly flows is identical for the two rivers. As hydrologic and climate data for a river characterized by a homogenized flow regime were not available, only a comparison of the inverted and natural-type regimes was performed. As these two types of regimes are diametrically different, this approach is sufficient to constrain the effect of dam management mode on the interannual variability of extreme flows downstream from dams.



**Figure 2.1** Location of study area.

The two watersheds under study are adjacent to one another. 1, Saint-Michel-des-Saints station (flow gauging and weather station) upstream from Matabin dam; 2, Reservoir Station (flow gauging) downstream from Matabin dam; 3, Joliette station (flow gauging and weather station) on L'Assomption River; 4, Rawdon station (flow gauging) downstream from Rawdon dam.





**Figure 2.2 Comparison of monthly discharge coefficients in pristine setting and downstream from dams.**  
 (a) Upstream (blue) and downstream (red) from the Matawin dam on the Matawin river. (b) In a natural setting (L'Assomption River, blue) and downstream from the Rawdon dam (Ouareau River, red).

The Matawin River is typical of Canadian Shield rivers in that it consists of nearly regular sequences of sandy and pebbly (sometimes rocky) sections. It drains a 5770 km<sup>2</sup> watershed. The regional climate is continental subpolar, with a depth of precipitation of approximately 1000 mm and a mean annual temperature of 4°C. The whole watershed is

located in the northern temperate vegetation zone, immediately south of the boreal zone, and the predominant bioclimatic domain is of the fir forest–yellow birch stand type. In 1929, the Shawinigan Water and Power Company built the Taureau Reservoir on the Matawin River (Table 2.1). The purpose of this reservoir was threefold: (i) to increase the winter capacity for the reservoirs of the Grand-Mère, Shawinigan 2 and 3, and la Gabelle hydroelectric plants, built on the Saint-Maurice River, (ii) to prevent flooding on the Saint-Maurice and (iii) to facilitate log driving from upstream. In the early 1960s, in the wake of nationalization of the energy sector by the Quebec government in 1962, Hydro-Quebec took over control of the reservoir (Fortier et al., 2011).

Matawin dam parameters are shown in Table 2.1. The Taureau Reservoir (Matawin dam) is an annual-type reservoir, meaning that it is filled to capacity every year with water coming exclusively from its watershed. The current management mode is characterized by a slight decrease below maximum operating elevation in the fall, which helps prevent fall floods (30-year recurrence) and, hence, flooding downstream from and at the level of the reservoir. This approach limits the need for high flow releases downstream from the dam during the fall flood. Emptying of the reservoir starts in mid-November and continues through the winter. High flows are maintained downstream from the dam in order to allow an ice-free channel to form on the Matawin River and thus avoid ice jams downstream. Since priming in 1931, management of water level in the reservoir has remained practically unchanged. This management mode has led to a complete inversion of the hydrologic regime of the Matawin River downstream from the reservoir, with maximum flows occurring in winter and minimum flows in the spring (Assani et al., 2002). Streamflow data have been collected since reservoir construction, in 1930, at the Saint-Michel-des-Saints station (1390 km<sup>2</sup>) located upstream from the reservoir and at a station located immediately downstream from the reservoir. Flow measured at the Saint-Michel-des-Saints station is in no way affected by the presence of the reservoir. In fact, it is a National Network of Reference Hydrometric Basin of Canada gauging station. Reference station selection for this network is based on very rigorous criteria regarding human impact, including the absence of urbanization or any major modification (such as deforestation) a 5- to 20-year span (Ouarda et al., 1999). As

for land use, not agricultural activity takes place in the Matawin River watershed. Human activity is restricted to commercial logging.

The L'Assomption River and its main tributary, the Ouareau River, both have their headwaters in the Canadian Shield. Unlike the Matawin River, they also flow through the St. Lawrence Lowlands, which are underlain by nearly flat unconsolidated deposits. Two thirds of their respective watersheds are located in the Canadian Shield and the remaining third, in the Lowlands, is taken up by intensive farming. The total aerial extents of the L'Assomption and Ouareau River watersheds are, respectively, 4220 km<sup>2</sup> and 1687 km<sup>2</sup>. Two dams were built on the Ouareau River, primarily for hydropower generation: the Rawdon dam, at the foot of the Canadian Shield, in 1913 (Table 2.1) and the Crabtree dam, in the St. Lawrence Lowlands, in 1917.

For the Ouareau River, streamflow data measured downstream from the Rawdon dam (1260 km<sup>2</sup>) were analysed. L'Assomption River streamflow has been measured continuously at the Joliette station (1340 km<sup>2</sup>) since 1923. Daily flow data measured at upstream from Matawin dam, downstream from Rawdon dam (Ouareau River) and Joliette station (L'Assomption River). In the Matawin River watershed, temperature and precipitation data were measured at dam level from 1925 to 1982 and at the Saint-Michel-des-Saints station since 1962. Because the coefficient of correlation between climate variables measured at both stations during the interval when data collection overlapped is greater than 0.90, a long time series of climate variables (1930-2008) was created by merging data from the two stations. Climate variables were also taken from an Environment Canada website on the same date as flow data [http://climat.meteo.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricData\\_f.html](http://climat.meteo.gc.ca/advanceSearch/searchHistoricData_f.html), consulted in March 2009). Daily flow data for flows released downstream from the Matawin dam after 1994 were kindly provided by Hydro-Québec, as these data are no longer archived by Environment Canada. However, data measured prior to 1994 were taken from the Environment Canada website. In the L'Assomption River watershed, climate data (temperature and precipitation) are measured at the Joliette station since 1913. Characterization of the types of seasonal flood management modes To characterize the

different seasonal flood management modes, flood hydrographs (showing daily flow variability as a function of time) for natural rivers were compared with those for flow downstream from dams for both watersheds and for each season, which are defined as follows: fall (October to December), winter (January to March), spring (April to June) and summer (July to September). This comparison was carried out for the period from 1930 to 2008. It was based solely on the relative timing of seasonal floods in natural rivers and downstream from dams compared with that of rainfall and/or snowmelt events. A seasonal flood is defined as the highest stream flow measured during a given season. In natural settings, seasonal floods are exclusively caused by abundant rainfall and/or snowmelt events.

**Table 2.1      Characteristics of two dams**

Name	ID*	Year of construction	Height (m)	Storage capacity (m <sup>3</sup> )	Reservoir surface area (ha)
Matawin	X0004459	1930	25	946 000 000	9 505
Rawdon	X0004205	1913	15	5 976 417	194

***Composition and statistical analysis of hydroclimatic series***

Statistical analysis of data was carried out in several steps:

- In the first step, the different types of flood management modes associated with dams were identified, and the frequency of occurrence of each type during each season was calculated. These frequency values were then compared for natural settings (rivers) and for flow downstream from dams for each watershed.
- The second step consisted in deriving a series of extreme maximum flows (highest daily flows measured each year during a given season) over the 1931-2008 period. To assess the impact of the scale of analysis on the relationship between climate

variables and streamflow, hydrological series of seasonal and annual mean flows were derived for both watersheds.

- In the third step, time series of the following climate variables were derived:
  - (1) an extreme maximum temperature series consisting of the highest temperature values measured each season of each year;
  - (2) a mean daily maximum temperature series consisting of mean values of maximum daily temperatures measured each season of each year;
  - (3) an extreme minimum temperature series consisting of the lowest temperature values measured each season of each year;
  - (4) a mean daily minimum temperature series consisting of mean values of minimum daily temperatures measured each season of each year;
  - (5) a mean daily temperature series consisting of mean values of maximum and minimum daily temperatures measures each season of each year;
  - (6) a series of total precipitation values fallen during a given season of each year;
  - (7) a series of total precipitation fallen exclusively as snow during a given season of each year; and
  - (8) a series of total precipitation fallen exclusively as rain during a given season of each year.

The rationale for using seasonal and annual, rather than daily, climate variables is that downstream from dams, some floods are observed in the absence of any measurable precipitation or snowmelt event in the watershed. Thus, daily precipitation data may not

be directly correlated with this type of flood. In contrast, temperature data may be correlated with these floods because they are likely to account for the occurrence of man-made floods downstream from dams in Quebec as a result of very cold climate conditions.

- In the fourth step, the interannual variability of daily, seasonal and annual flow series for natural settings (rivers) were compared with time series of streamflow measured downstream from dams to constrain the effect of flood management mode on this variability. This was carried out using the Lombard method, which many authors have already described (e.g. Lombard, 1987; Assani et al., 2011, 2012; Quessy et al., 2011). This method can be used to determine the date of a shift in the mean values of a hydroclimatic series and the nature of such a shift (abrupt or smooth). It should be noted that this method was applied to non-autocorrelated series.
- The last step consisted in correlated streamflow to climate variable series derived in the third step. A simple correlation method was first applied, followed by a canonical correlation approach. The latter approach brings out any link among the various climate variables (independent variables), on one hand, and the hydrologic variables (dependent variables), on the other, as well as between the two groups of variables. This method has also been widely described in the literature (see, among others, Afifi and Clark, 1996; Meddi et al., 2010).

## RESULTS

### *Comparison of the types of seasonal flood management mode and their frequency in the two watersheds*

Comparison of seasonal flood hydrographs for natural settings (rivers) and for streamflow downstream from dams in the two watersheds led to the identification of four types of seasonal flood management modes at dam level. It is important to specify that this comparison does not take into account the magnitude of seasonal floods. The

first management mode (type A) is characterized by the synchronous occurrence of seasonal floods in the natural setting and downstream from a dam. Thus, dams have little or no effect on the timing of seasonal floods. It follows that seasonal floods in natural rivers and downstream from dams are caused by the same rainfall and/or snowmelt events (Figure 2.3). The second management mode (type B) is characterized by the non-synchronous occurrence of seasonal floods in natural settings and downstream from dams. Thus, seasonal floods in natural rivers and downstream from dams are not related to the same rainfall and/or snowmelt events. A seasonal flood downstream from a dam may occur before or after such a flood in the natural setting (Figure 2.4). The third management mode (type C) is characterized by the absence of any seasonal flood downstream from a dam because all the water from the natural seasonal flood (coming from upstream) is stored in the reservoir (Figure 2.5). Thus, seasonal floods in natural settings coincide with periods of low flow downstream from dams. Finally, the fourth management mode (type D) is characterized by the lack of relationship between the occurrence of seasonal floods downstream from dams and that of seasonal floods in natural rivers. This is the opposite of type C management mode. Seasonal floods occurring downstream from dams are therefore man-made because they are not caused by any rainfall and/or snowmelt events (Figure 2.6).

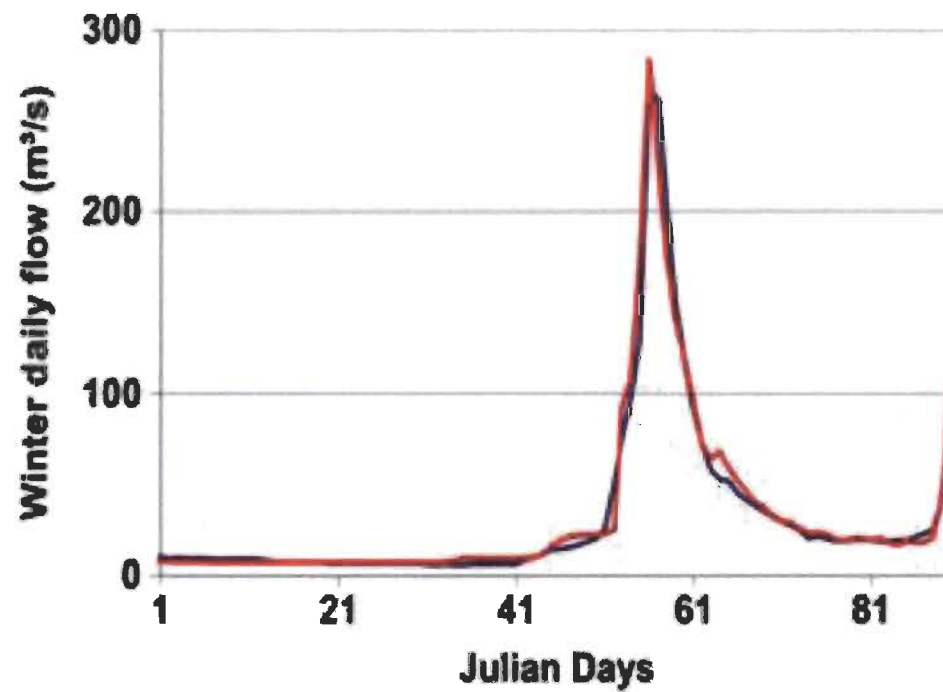


Figure 2.3 Type A seasonal flood management mode. Seasonal floods in the natural setting (blue line) and downstream from the dam (red line) are produced by the same rainfall and/or snowmelt events and are synchronous.



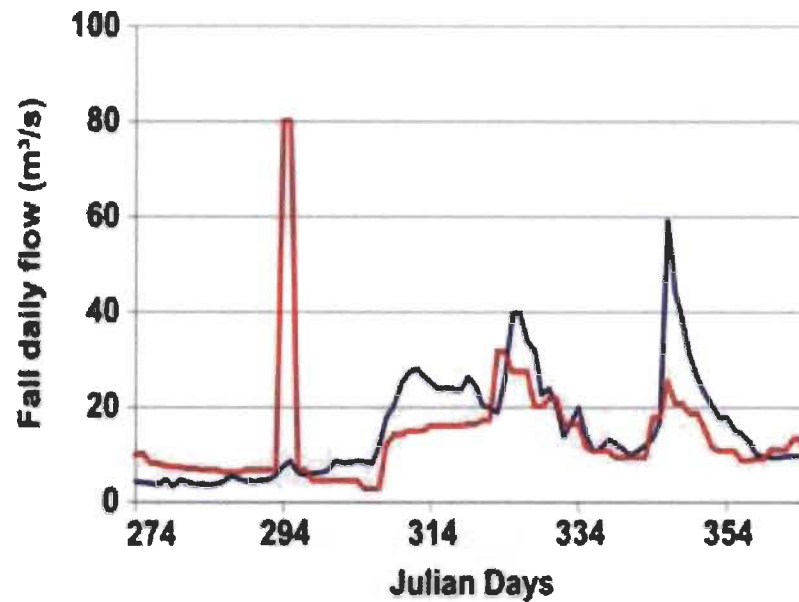


Figure 2.4 Type B seasonal flood management mode. Seasonal floods in the natural setting (blue line) and downstream from the dam (red line) are not produced by the same rainfall and/or snowmelt events and are not synchronous.

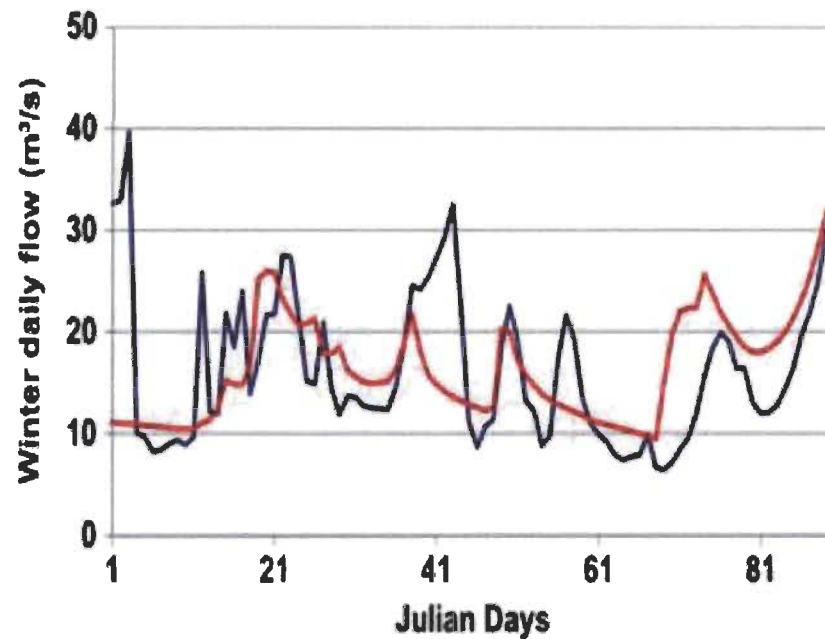
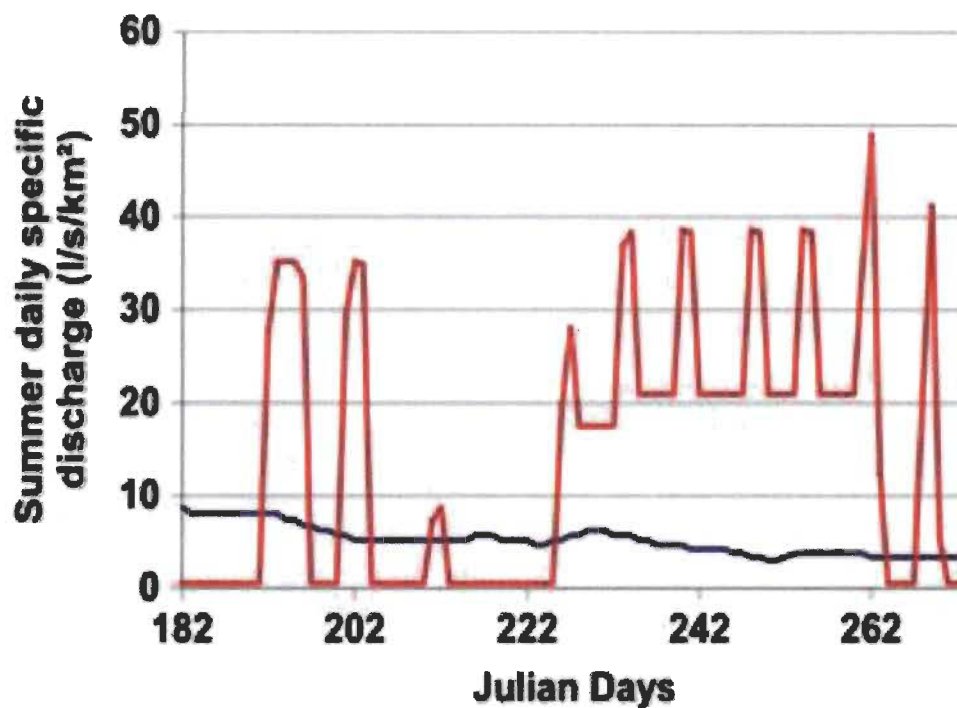
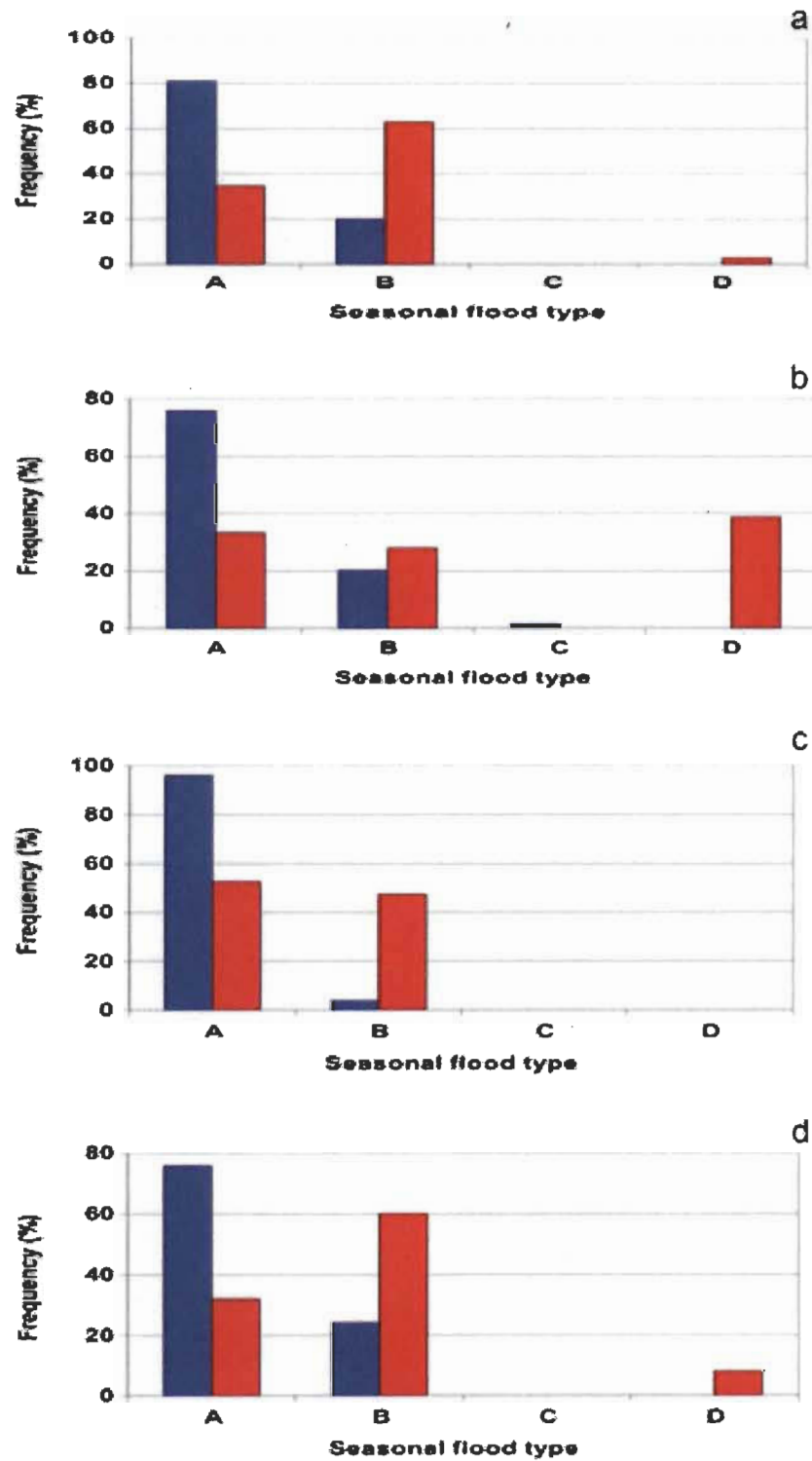


Figure 2.5 Type C seasonal flood management mode. Seasonal floods in the natural setting (blue line) and downstream from the dam (red line) are not produced by the same rainfall and/or snowmelt events. The timing of seasonal floods in the natural setting coincides with low flows downstream from the dam.



**Figure 2.6** Type D seasonal flood management mode (man-made flood). Seasonal floods in the natural setting (blue line) and downstream from the dam (red line) are not produced by the same rainfall and/or snowmelt events. The timing of seasonal floods downstream from the dam coincides with low flows upstream from the dam.

In fact, these man-made seasonal floods occur in periods of low flow in the natural setting. A comparison of the frequency of these four types of floods reveals that type A seasonal floods are the most frequent downstream from the Rawdon dam, in the L'Assomption River watershed, in all four seasons (Figure 2.7). It should be recalled that this dam induces a natural-type regulated flow regime. Frequency is relatively low for other types of floods. No type D seasonal flood (man-made flood) is observed downstream from this dam. Downstream from the Matawin dam, which induces an inversion-type regulated hydrologic regime, type B floods are the most frequent over the four seasons, although in winter, type D is the most dominant (Figure 2.7b), accounting for more than a third of all seasonal floods recorded for that season downstream from the Matawin dam.



**Figure 2.7** Seasonal frequency of the different types of seasonal floods observed downstream from the Rawdon dam (blue bars) and the Matawin dam (red bars) from 1930 to 2008. (a) Fall; (b) winter; (c) spring; (d) summer.

***Impacts of flood management mode on the interannual variability of the magnitude of seasonal floods***

To constrain the impact of the frequency of the four types of flood management modes on the interannual variability of the magnitude of seasonal floods downstream from dams, this variability was compared with floods in natural rivers and downstream from dams in both watersheds. The impact of management mode frequency on seasonal and annual mean flows was also analysed. Results obtained using the Lombard method are presented in Table 2.2, from which it can be seen that, at the three different time scales (daily, seasonal and annual), there is no difference in the interannual variability of flows measured at the Joliette station on the L'Assomption River and downstream from the Rawdon dam, on the Ouareau River, except for fall seasonal flows that show a significant increase (Figures 2.8: 2.11). It should be recalled that, at both stations, type A management mode is the most frequent for all four seasons. This mode is characterized by the absence of any impact of the dam on the timing of seasonal floods downstream from it. In contrast, in the Matawin River watershed, a significant difference is observed in the interannual variability at all scales, particularly at the daily scale. Downstream from the Matawin dam, seasonal daily maximum flows decrease significantly over time, whereas those measured upstream from the dam increase significantly (except for summer flows) over time (Figures 2.8: 2.11). At the monthly scale, although upstream from the Matawin dam, winter and spring seasonal daily mean flows increase significantly over time; this change is not seen downstream from the dam, where fall flows increase significantly, whereas summer flows decrease significantly over time. These changes are not observed upstream from the dam. Finally, at the annual scale, whereas annual mean flow increase significantly upstream from the dam, no change is observed downstream.

**Table 2.2 Comparison of the interannual variability of seasonal daily maximum extreme flows in a natural setting (pristine) and downstream from dams (1930-2008). Lombard method results**

		L'Assomption River (Pristine River)			Ouareau River (downstream from Rawdon dam)		
Scale	Seasons	Sn	T1	T2	Sn	T1	T2
<b>Daily</b>	Fall	0.0337	-	-	0.0280	-	-
	Winter	<b>0.0827</b>	1972	1973	<b>0.0739</b>	1972	1973
	Spring	0.0249	-	-	0.0220	-	-
	Summer	0.0058	-	-	0.0197	-	-
<b>Seasonal</b>	Fall	0.0330	-	-	<b>0.0718</b>	1931	1993
	Winter	0.0258	-	-	0.0297	-	-
	Spring	0.0014	-	-	0.0004	-	-
	Summer	0.0100	-	-	0.0007	-	-
<b>Annual</b>		0.0089	-	-	0.0301	-	-
		Upstream from Matawin dam			Downstream from Matawin dam		
<b>Daily</b>	Fall	<b>0.0799</b>	1983	1984	<b>0.0460</b>	1987	1988
	Winter	<b>0.1474</b>	1969	1970	<b>0.2542</b>	1958	1984
	Spring	<b>0.1048</b>	1964	1967	<b>0.0885</b>	1983	1984
	Summer	0.0058	-	-	<b>0.1450</b>	1985	1986
<b>Seasonal</b>	Fall	0.0321	-	-	<b>0.0605</b>	1954	1955
	Winter	<b>0.1231</b>	1971	1972	0.0222	-	-
	Spring	<b>0.0843</b>	1972	1973	0.0011	-	-
	Summer	0.0097	-	-	<b>0.2185</b>	1976	1977
<b>Annual</b>		<b>0.0935</b>	1965	1966	0.0026	-	-

Values of Sn > 0.0403 that are statistically significant at the 5% level are shown in bold. T1 and T2 are years corresponding to beginning and end, respectively, of a significant change in mean.

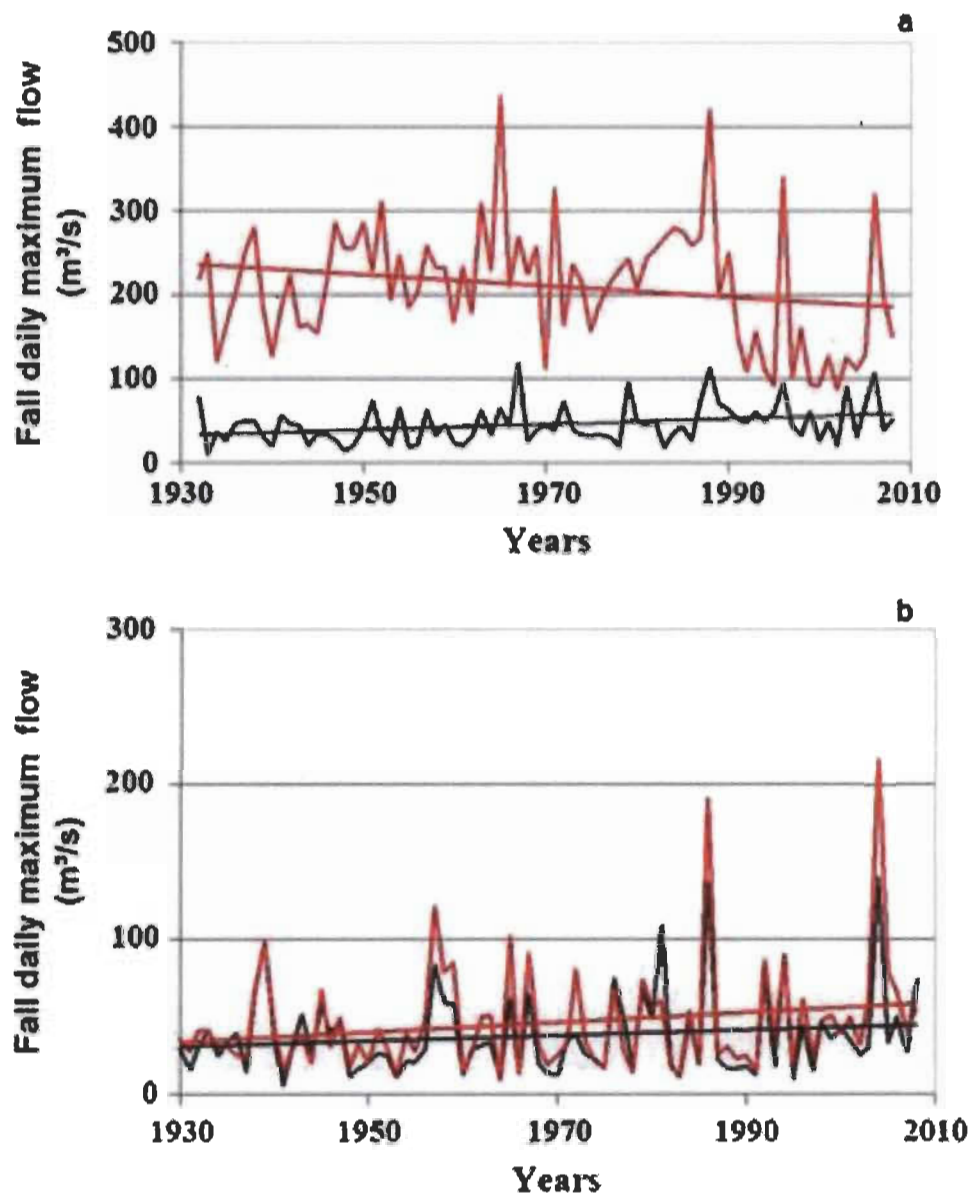


Figure 2.8 Comparison of interannual variability of fall daily maximum flows in pristine setting and downstream from dams. (a) Upstream (black curve) and downstream from the Matawin dam (red curve) on the Matawin river. (b) In a natural setting (L'Assomption River, black curve) and downstream from the Rawdon dam (Ouareau River, red curve).

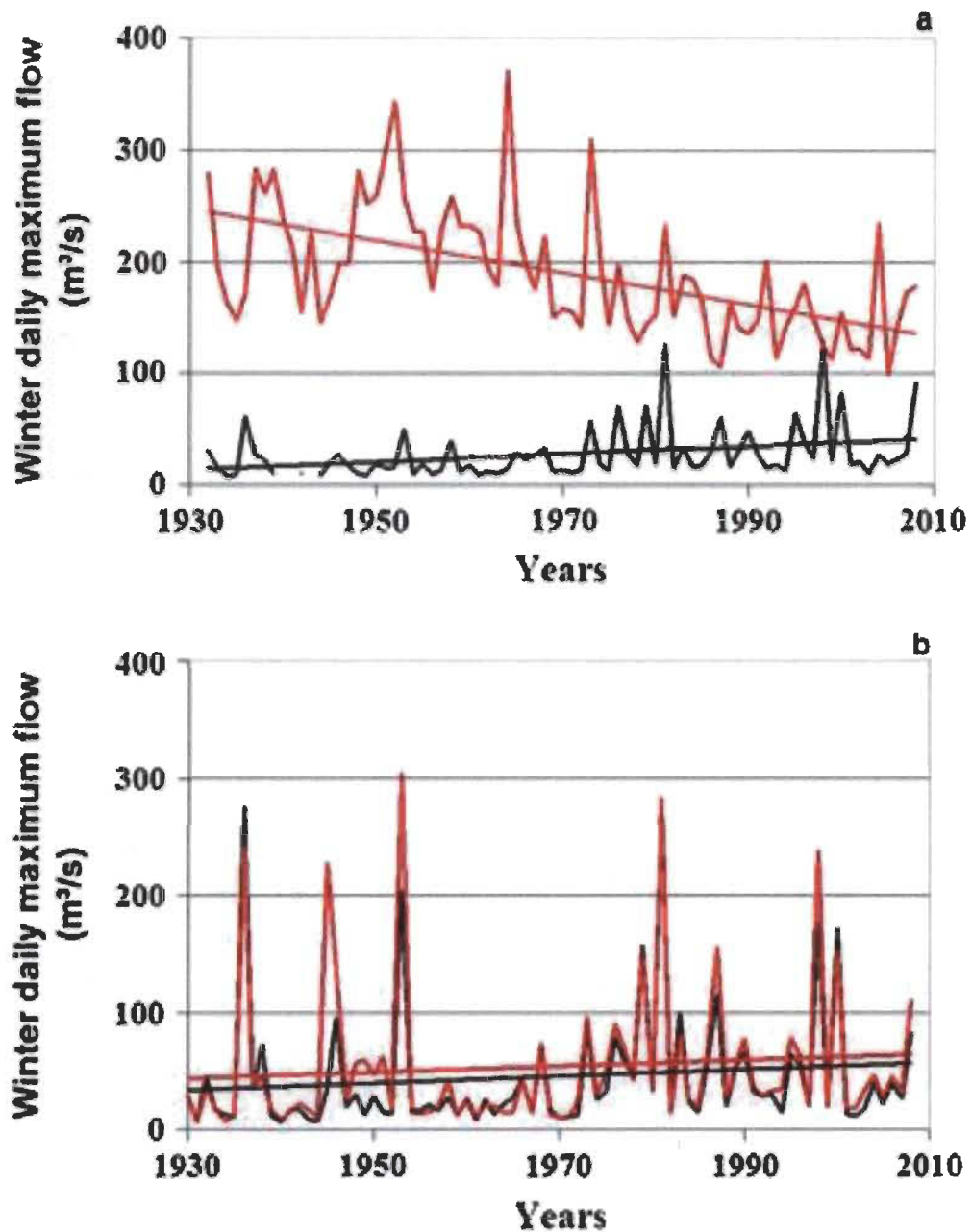


Figure 2.9 Comparison of interannual variability of winter daily maximum flows in pristine setting and downstream from dams. (a) Upstream (black curve) and downstream from the Matawin dam (red curve) on the Matawin River. (b) In a natural setting (L'Assomption River, black curve) and downstream from the Rawdon dam (Ouareau River, red curve).

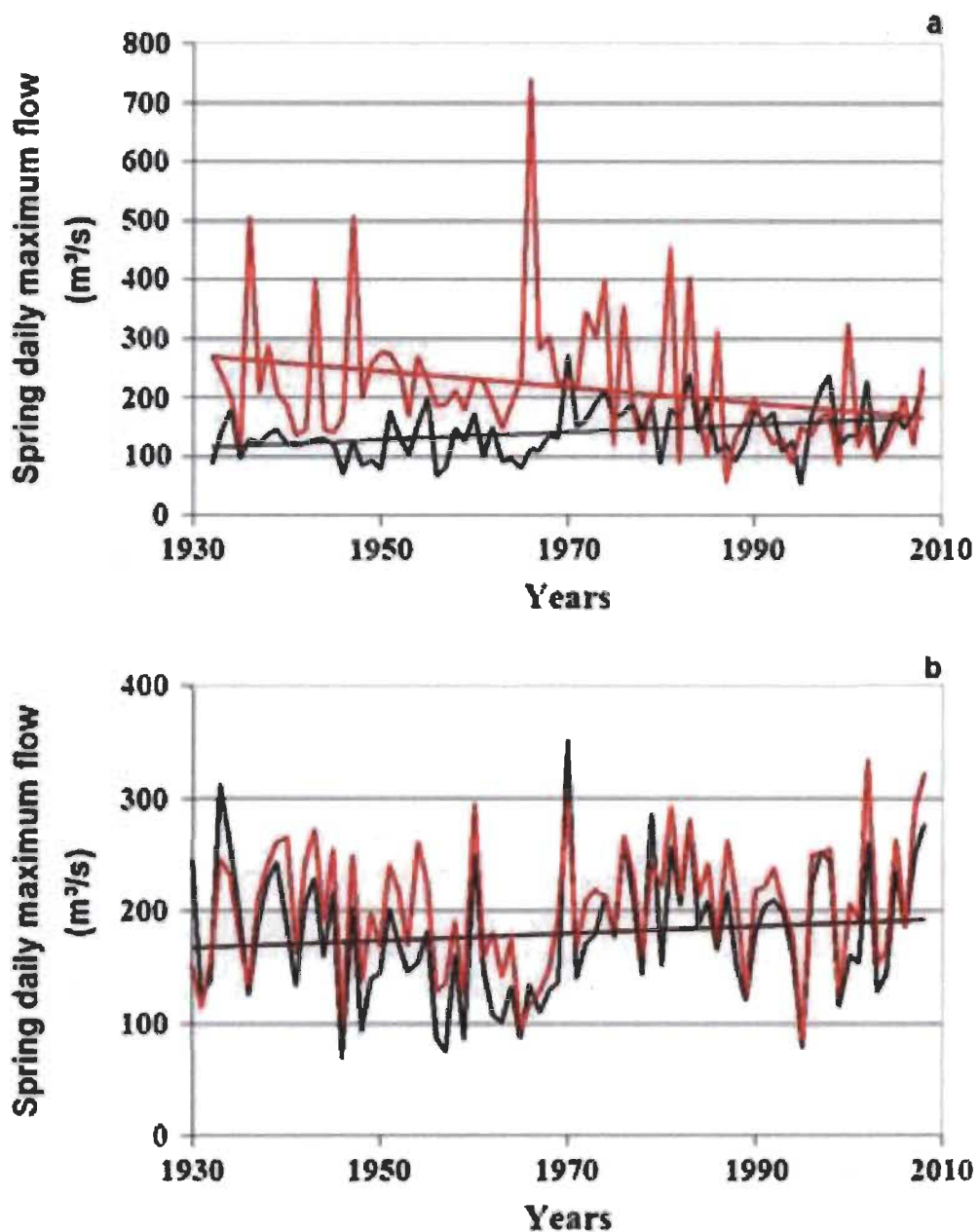


Figure 2.10 Comparison of interannual variability of spring daily maximum flows in pristine setting and downstream from dams. (a) Upstream (black curve) and downstream from the Matawin dam (red curve) on the Matawin River. (b) In a natural setting (L'Assomption River, black curve) and downstream from the Rawdon dam (Ouareau River, red curve).



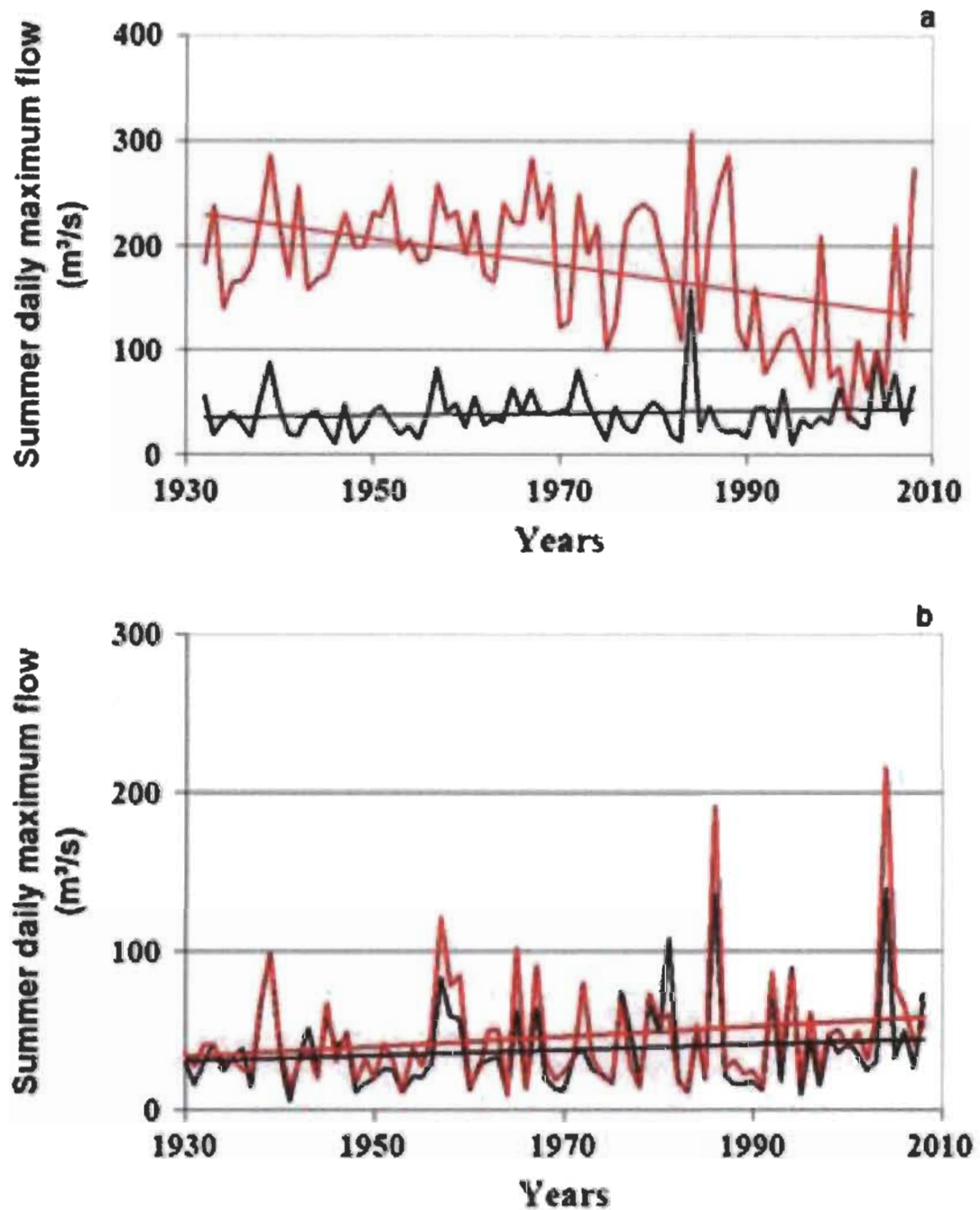


Figure 2.11 Comparison of interannual variability of summer daily maximum flows in pristine setting and downstream from dams. (a) Upstream (black curve) and downstream from the Matawin dam (red curve) on the Matawin river. (b) In a natural setting (L'Assomption River, black curve) and downstream from the Rawdon dam (Ouareau River, red curve).

### *Link between climate variables and streamflow*

Because canonical correlation analysis did not yield conclusive results at all time scales, only simple correlation analysis was used to look at the relationship between climate variables and flows measured in natural rivers and downstream from dams. Coefficient of correlation values are shown in Tables 2.3: 3.6. At the daily scale, in the Matawin River watershed, maximum flows upstream from the dam are mainly correlated with rainfall for all seasons except spring and, to a lesser extent, with maximum daily temperature in winter and summer (Table 2.3). In contrast, downstream from the dam, no significant correlation is observed for any season between maximum flows and climate variables. In the L'Assomption River watershed, maximum flows downstream from the Rawdon dam (Ouareau River) and at the Joliette station (L'Assomption River) are correlated to nearly the same climate variables (Table 2.4). At the seasonal scale, in the Matawin River watershed, flows in winter and summer are not significantly correlated with any of the climate variables downstream from the Matawin dam. In contrast, in the L'Assomption River watershed, downstream from the Rawdon dam as in the L'Assomption River, flows for all four seasons are significantly correlated with climate variables (Table 2.5). The strongest correlation observed is between rainfall and streamflow, both downstream from dams and in natural settings, in both watersheds. In the L'Assomption River watershed, the correlation is stronger during the cold part of the year (fall and winter) than during the warm part of the year (spring and summer). Aside from precipitation, flows are also correlated with temperature in winter (in the L'Assomption River watershed and upstream from the Matawin dam), spring (in the L'Assomption River watershed only) and summer (upstream from the Matawin dam only). The correlation between temperature and streamflow is negative for spring and summer but positive for winter. At the annual scale, mean annual flows measured in both watersheds downstream from dams and in natural settings show a significant correlation with the same climate variables, namely rainfall and total precipitation (Table 2.6). However, downstream from the Matawin dam, which is characterized by an inversion-type management mode, coefficients of correlation between streamflow and these two climate variables are smaller than for the other three sites. At the annual scale, streamflow is not significantly correlated with any temperature variable.

**Table 2.3** Coefficients of correlation calculated between seasonal daily maximum flows and climate variables upstream and downstream from the Matawin dam (1930-2008).

Climates variables	Upstream from Matawin dam				Downstream from Matawin dam			
	FA	WI	SP	SU	FA	WI	SP	SU
TEMAX	-0.065	<b>0.286</b>	-0.101	<b>-0.367</b>	-0.014	0.015	0.017	-0.110
TMMAX	-0.021	<b>0.369</b>	-0.070	-0.167	0.029	0.006	0.057	-0.148
TEMIN	0.057	0.211	0.014	0.043	0.168	0.091	0.088	-0.061
TMMIN	0.142	<b>0.281</b>	-0.027	0.033	0.147	0.002	0.092	-0.015
TME	0.014	<b>0.257</b>	-0.051	-0.091	0.172	-0.035	0.124	-0.105
SN	-0.127	-0.138	0.114	-	0.194	-0.089	-0.122	-
RN	<b>0.555</b>	<b>0.540</b>	0.196	<b>0.471</b>	0.101	0.020	0.0144	0.227
TP	<b>0.419</b>	0.214	0.218	<b>0.472</b>	0.228	-0.004	-0.015	0.225

Significant coefficient of correlation values at the 5% level are shown in bold. FA, fall; WI, winter; SP, spring; Su, summer; TEMA<sub>X</sub>, extreme maximum temperature series; TMMAX, mean daily maximum temperature series; TEMIN, extreme minimum temperature series; TMMIN, mean daily minimum temperature series; TME, mean daily temperature series; TP, series of total precipitation; SN, series of total precipitation fallen exclusively as snow; RN, series of total precipitation fallen exclusively as rain.

**Table 2.4** Coefficients of correlation calculated between seasonal daily maximum flows and climate variables (1930–2008). L'Assomption and Ouareau Rivers

Climate variables	L'Assomption River				Ouareau River (downstream Rawdon dam)			
	FA	WI	SP	SU	FA	WI	SP	SU
TEMAX	-0.124	<b>0.389</b>	0.194	0.034	-0.109	<b>0.431</b>	0.195	0.056
TMMAX	-0.090	<b>0.3050</b>	0.148	-0.073	-0.073	<b>0.334</b>	0.145	-0.081
TEMIN	0.0340	0.0581	0.099	-0.044	0.040	0.094	0.105	0.007
TMMIN	0.0270	0.1906	0.194	0.129	0.129	0.206	0.200	0.117
TME	-0.030	<b>0.246</b>	0.029	0.092	-0.016	<b>0.274</b>	0.039	0.091
SN	-0.199	-0.125	<b>0.362</b>	-	<b>-0.257</b>	-0.139	<b>0.321</b>	-
RN	<b>0.564</b>	<b>0.683</b>	0.239	<b>0.417</b>	<b>0.579</b>	<b>0.629</b>	<b>0.266</b>	<b>0.385</b>
TP	<b>0.349</b>	<b>0.364</b>	<b>0.294</b>	<b>0.417</b>	<b>0.350</b>	<b>0.319</b>	<b>0.313</b>	<b>0.385</b>

Significant coefficient of correlation values at the 5% level are shown in bold. FA, fall; WI, winter; SP, spring; Su, summer; TEMA<sub>X</sub>, extreme maximum temperature series; TMMAX, mean daily maximum temperature series; TEMIN, extreme minimum temperature series; TMMIN, mean daily minimum temperature series; TME, mean daily temperature series; TP, series of total precipitation; SN, series of total precipitation fallen exclusively as snow; RN, series of total precipitation fallen exclusively as rain.

**Table 2.5** Coefficients of correlation calculated between seasonal daily mean flows and climate variables (1930-2008).

Climate variables	L'Assomption catchment		Matawin catchment	
	L'Assomption River	Ouareau River (downstream from dam)	Matawin River (upstream from dam)	Matawin River (downstream from dam)
<b>Fall</b>				
TMMAX	-0.0470	-0.0199	-0.0803	-0.1805
TMMIN	0.1116	0.1331	0.1722	-0.0143
TEM	0.0426	0.0689	0.0067	-0.1387
SN	-0.1575	-0.2226	-0.0676	-0.0802
RN	<b>0.6483</b>	<b>0.6689</b>	<b>0.5878</b>	<b>0.3401</b>
TP	<b>0.4400</b>	<b>0.4293</b>	<b>0.4910</b>	<b>0.3050</b>
<b>Winter</b>				
TMMAX	<b>0.4147</b>	<b>0.4300</b>	<b>0.3745</b>	0.1430
TMMIN	0.2304	0.2407	<b>0.2984</b>	0.1376
TEM	<b>0.3334</b>	<b>0.3431</b>	0.2388	0.0631
SN	-0.0925	-0.0994	-0.0480	0.0044
RN	<b>0.7237</b>	<b>0.7233</b>	<b>0.5453</b>	0.0115
TP	<b>0.3989</b>	<b>0.3923</b>	<b>0.2608</b>	0.0006
<b>Spring</b>				
TMMAX	-0.0960	-0.1393	-0.0034	<b>-0.4390</b>
TMMIN	-0.0375	-0.0934	-0.0635	-0.2205
TEM	<b>-0.2833</b>	<b>-0.3249</b>	0.1364	<b>-0.3799</b>
SN	<b>0.4422</b>	<b>0.4288</b>	-0.0168	-0.1596
RN	<b>0.4276</b>	<b>0.4443</b>	<b>0.3440</b>	<b>0.4763</b>
TP	<b>0.4862</b>	<b>0.5005</b>	<b>0.3286</b>	<b>0.5023</b>
<b>Summer</b>				
TMMAX	-0.1707	-0.2200	<b>-0.2580</b>	-0.1896
TMMIN	0.0838	0.0648	0.0317	0.0383
TEM	0.0444	0.0184	-0.1463	-0.0981
SN	-	-	-	-
RN	<b>0.4032</b>	<b>0.4030</b>	<b>0.5323</b>	0.1033
TP	<b>0.4032</b>	<b>0.4030</b>	<b>0.5323</b>	0.1041

Significant coefficient of correlation values at the 5% level are shown in bold. TEMAX, extreme maximum temperature series; TMMAX, mean daily maximum temperature series; TMMIN, extreme minimum temperature series; TMMIN, mean daily minimum temperature series; TEM, mean daily temperature series; TP, series of total precipitation; SN, series of total precipitation fallen exclusively as snow; RN, series of total precipitation fallen exclusively as rain.

**Table 2.6 Coefficients of correlation calculated between mean annual flows and climate variables (1930-2008).**

Climate Variables	L'Assomption catchment		Matawin catchment	
	L'Assomption River	Ouareau River (downstream from dam)	Matawin River (upstream from dam)	Matawin River (downstream from dam)
TMMAX	0.0026	0.0428	0.0679	-0.1749
TMMIN	0.0347	0.1185	0.2189	0.0125
TEM	-0.0568	0.0344	0.1178	-0.1346
SN	0.2489	0.2410	<b>0.3032</b>	<b>0.2983</b>
RN	<b>0.5969</b>	<b>0.6500</b>	<b>0.6298</b>	<b>0.3600</b>
TP	<b>0.6796</b>	<b>0.7147</b>	<b>0.6205</b>	<b>0.3911</b>

Significant coefficient of correlation values at the 5% level are shown in bold. TEMAX, extreme maximum temperature series; TMMAX, mean daily maximum temperature series; TMMIN, extreme minimum temperature series; TMMIN, mean daily minimum temperature series; TME, mean daily temperature series; TP, series of total precipitation; SN, series of total precipitation fallen exclusively as snow; RN, series of total precipitation fallen exclusively as rain.

## DISCUSSION AND CONCLUSION

The effect of climate on the interannual variability of streamflow downstream from dams is a much debated topic. This debate stems from differences in scales and methods of analysis. To address this issue, the study aimed to analyse the effects of seasonal flood management modes on the relationship between climate and streamflow downstream from two types of dams characterized by different modes of management of seasonal floods. The study yields three significant results:

- (1) As far as seasonal flood management mode is concerned, four types of floods downstream from dams were identified and described, each corresponding to a specific management mode. The existence of these four types of floods shows that streamflow management downstream from dams is not uniform but changes from one dam to another. Poff et al. (2007), among others, have argued that streamflow is homogeneous downstream from dams. According to this argument, dams affect river systems similarly despite a large gradient in natural hydrologic character. It is suggested that this homogeneity is the main factor accounting for the lower diversity of aquatic fauna downstream from dams (Moyle and Mount, 2007). Many authors who have highlighted the

heterogeneous nature of the impacts of dams on streamflow have questioned this interpretation (e.g. Piron and Neumann, 2008; Assani et al., 2011; McManamay et al., 2012).

- (2) Most of these authors, however, have highlighted a spatial, rather than temporal, heterogeneity. Factors that can account for such spatial heterogeneity are dam type, dam operation, dam storage capacity and geographical setting. In contrast, very few studies have looked at the impacts of dams on the temporal heterogeneity (interannual variability) of streamflow, such that the factors affecting this heterogeneity remain poorly constrained. Comparison of flood management modes at dams led to the recognition that the difference in interannual variability (temporal heterogeneity) of streamflow observed downstream from these dams is due to variability in modes of flood management. Downstream from the Matawin dam, the interannual variability of seasonal maximum flows is significantly different from that of flows downstream from the Rawdon dam and in natural rivers. Thus, downstream from the Matawin dam, the relatively high frequency of seasonal floods that are not caused by the same rainfall and/or snowmelt events as those that cause floods in natural rivers (types B and D management modes) would explain this difference in the interannual variability of the magnitude of seasonal floods. This variability is characterized by a significant decrease in the magnitude of seasonal daily maximum flows over time for all four seasons, whereas upstream from the Matawin dam and downstream from the Rawdon dam, this magnitude increases or remains unchanged over time. This change in the interannual variability of daily flows is propagated at the seasonal and annual scales.
- (3) Thus, the change in the interannual variability of seasonal daily maximum flows resulting from the mode of management of seasonal floods affects the relationship between climate variables and streamflow. Downstream from the Matawin dam, unlike the Rawdon dam, seasonal daily maximum flows are not correlated to any climate variables, mainly due to the fact that seasonal floods

are not produced by the same rainfall and/or snowmelt events as those that produce seasonal floods in the natural setting. In addition, the frequency of man-made seasonal floods that are not the result of any particular rainfall and/or snowmelt event is relatively high, particularly in winter, due to the release of water to supply hydroelectric power plants located downstream. It follows that, depending on the mode of management of floods, streamflow downstream from dams may or may not be correlated to climate variables.

The study highlights the fact that the relationship between streamflow and climate variables downstream from dams in Quebec depends on two factors: the mode of management of seasonal floods at the dams and the scale of analysis. For flood management mode, the high frequency of seasonal floods not produced by the same rainfall and/or snowmelt events as those in natural rivers has a significant impact on the interannual variability of streamflow downstream from dams, which limits the impact of climate on this variability. This effect of flood management mode does, however, become less important at the annual scale. Finally, although this study only looked at two dams, its conclusions can be extended to all other dams based on their modes of management because, as mentioned previously, all dams in Quebec subjected to the same management mode produce the same types of hydrological changes.

## Références

- Afifi AA, Clark V. 1996. Computer-aided multivariate analysis. 3rd edition. Chapman and Hall: New York; 505.
- Assani A. A., T. Buffin-Bélanger et A.G. Roy. (2002). "Analyse d'impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada)". *Revue des sciences de l'eau* 15: 557-574.
- Assani A. A., E. Gravel, T. Buffin-Bélanger et A.G. Roy (2005). "Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada)". *Revue des sciences de l'eau* 18: 103-127.
- Assani A. A., É. Stichelbout, A.G. Roy et F. Petit (2006). "Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes in Québec (Canada)". *Hydrological Processes* 20: 3485-3501.
- Assani A. A., F. Lajoie, et C. Laliberté (2007). "Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels en fonction du mode de gestion et de la taille des bassins versants au Québec". *Revue des sciences de l'eau* 20: 127-146.
- Assani AA, Landry R, Daigle J, Chalifour A. 2011. Reservoirs effects on the interannual variability of winter and spring streamflow in the St-Maurice River watershed (Quebec, Canada). *Water Resources Management* 25: 3661-3675.
- Assani AA, Landry R, Laurencelle M. 2012. Comparison of interannual variability modes and trends of seasonal precipitation and streamflow in Southern Quebec (Canada). *River Research and Applications*, 28: 1740-1752.
- Fortier C, Assani AA, Mesfioui M, Roy AG (2011) Comparison of the interannual and interdecadal variability of heavy flood characteristics upstream and downstream from dams in inversed hydrologic regime: case study of Matawin River (Québec, Canada). *River Research and Applications* 27: 1277-1289.
- Hotchkiss RH, Jorgensen SF, Stone Mc, Fontaine TA. 2000. Regulated river modeling for climate change. Impact assessment: The Missouri River. *Journal of American Association of Water Resources* 36: 375-386.
- Jay DA, Naik PK. 2011. Distinguishing human and climate influences on hydrological disturbance processes in the Columbia River, USA. *Hydrological Sciences Journal* 56: 1186-1209.



- Lajoie F., A. A. Assani, A.G. Roy et M. Mesfioui (2007). "Impacts of dam on monthly flow characteristics. The influence of watershed size and seasons". *Journal of Hydrology* 334: 423-439.
- Lombard F. 1987. Rank tests for changepoint problems. *Biometrika* 74: 615-624.
- López-Moreno JJ, Vicente-Serrano SM, Begueria S, Gracia-Ruiz JM, Portela MM, Almeida AB (2009) Dam effects on droughts magnitude and duration in a Transboundary basin: The Lower River Tagus, Spain and Portugal. *Water Resources Research* 45: W02405, doi: 10.1029 / 2008WR007198.
- Matteau M, Assani AA, et Mesfioui M. 2009. Application of multivariate statistical analysis methods to the dam hydrologic impact studies. *Journal of Hydrology*, 371, 120-128.
- McManamay RA, Orth DJ, Dolloff CA. 2012. Revisiting the homogenization of dammed rivers in the southeastern US. *Journal of Hydrology* 424-425: 217-237.
- Meddi M, Assani AA, Meddi H. 2010. Temporal of annual rainfall in the Macta and Tafna catchments, Northwestern Algeria. *Water Resources Management* 24: 3817-3833.
- Moyle PB, Mount JF. 2007. Homogenous rivers, homogenous faunas. *Proceedings of National Academic Sciences USA* 104: 5711-5712.
- Naik PK, Jay DA. 2011a. Human and climate impacts on Columbia River hydrology and salmoids. *River Research and Applications* 27: 1270-1276.
- Naik PK, Jay DA. 2011b. Distinguishing human and climate influences on the Columbia River: Changes in mean flow and sediment transport. *Journal of Hydrology* 404: 259-277.
- Ouarda TBMJ., Rasmussen PF., Cantin J-F, Bobée B, Laurence R, Hoang VD, Barabé G. 1999. Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec. *Revue des Sciences de l'Eau* 12: 425-448.
- Piron M, Neumann K. 2008. Hydrologic alterations in the Wabash River watershed, USA. *River Research and Applications* 24: 1175-1184.
- Poff NL, Olden JD, Merritt DM, Pepin DM. 2007. Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications. *Proceedings of National Academic Sciences USA* 104: 5732-5737.

- Quessy J-F, Favre A-C, Saïd M, Champagne M. 2011. Statistical inference in Lombard's smooth-change model. *Environmetrics* 22: 882-893.
- St-Jacques JM, Sauchyn DJ, Zhao Y. 2010. Northern Rocky Mountain streamflow records: global warming trends, human impacts or natural variability? *Geophysical Research Letters* 37: L06407, doi: 10.1029 / 2009GL042045
- Villarini G, Smith JA. 2010. Flood peak distributions for the eastern United States. *Water Resources Research* 46: W06504, doi: 10.1029 / 2009WR008395
- Villarini G, Smith JA, Serinaldi F, Ntelekos AA. 2011a. Analyses of seasonal and annual maximum daily discharge records for central Europe. *Journal of Hydrology* 399: 299-312.
- Villarini G, Smith JA, Serinaldi F, Ntelekos AA, Schwarz U. 2011b. Analyses of extreme flooding in Austria over the period 1951–2006. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.2331 (in press).
- Zhao Q, Liu S, Deng L, Dong S, Yang J, Wang C. 2012. The effects of dam construction and precipitations variability on hydrologic alteration in the River Basin of Southwest China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, doi: 10.1007/s00477-012-0583-z (in press).

## **CHAPITRE III**

### **CONCLUSION**

La relation entre le climat et les débits en aval des barrages fait l'objet de controverse dans la littérature scientifique internationale. En Amérique du Nord, la thèse la plus répandue est celle fondée sur l'absence de corrélation entre les débits et le climat en aval des barrages. L'objectif de notre étude était de vérifier la pertinence de cette thèse au Québec. Pour atteindre cet objectif, on a analysé les débits mesurés en aval de deux barrages se différenciant par le mode de gestion. Ces débits ont été comparés à ceux mesurés en sites naturels (sans influence des barrages). L'originalité de notre travail est de formuler deux nouvelles hypothèses sur le lien entre le climat et les débits en aval des barrages. La première hypothèse stipule que ce lien dépend de modes de gestion des crues saisonnières, considérés comme facteur principal de la variabilité temporelle des débits en aval des barrages. La seconde hypothèse affirme que ce lien dépend aussi de l'échelle d'analyse. Les résultats obtenus ont validé ces deux hypothèses. La description des modes de gestion des crues saisonnières a révélé que la fréquence des crues saisonnières artificielles (qui ne sont pas générées par aucun épisode de pluie/ou de fonte de neige) influence significativement le lien entre le climat et les débits en aval des barrages. Au cours d'une saison donnée, plus les crues saisonnières sont plus fréquentes, moins les débits en aval des barrages sont corrélés aux variables climatiques. Mais cette absence de corrélation dépend de l'échelle temporelle d'analyse. À l'échelle journalière, l'absence de corrélation entre ces variables est manifeste, mais elle s'estompe progressivement aux échelles saisonnières et annuelles.

Dans une perspective de prédictions des débits en aval des barrages caractérisés par un régime hydrologique régularisé de type inversion au moyen des modèles hydroclimatiques, il convient de tenir compte de ces résultats. Les prédictions seraient plus prometteuses à l'échelle annuelle qu'à l'échelle journalière. À l'échelle saisonnière, l'efficacité dépendra de type de saison. Une conclusion détaillée est présente dans l'article publié, soit au chapitre II de ce mémoire.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Assani A. A., T. Buffin-Bélanger et A.G. Roy (2002). "Analyse d'impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada)". *Revue des sciences de l'eau* 15: 557-574.
- Assani A. A., E. Gravel, T. Buffin-Bélanger et A.G. Roy (2005). "Impacts des barrages sur les débits annuels minimums en fonction des régimes hydrologiques artificialisés au Québec (Canada)". *Revue des sciences de l'eau* 18: 103-127.
- Assani A. A., É. Stichelbout, A.G. Roy et F. Petit (2006). "Comparison of impacts of dams on the annual maximum flow characteristics in three regulated hydrologic regimes in Québec (Canada)". *Hydrological Processes* 20: 3485-3501.
- Assani A. A., F. Lajoie, et C. Laliberté (2007). "Impacts des barrages sur les caractéristiques des débits moyens annuels en fonction du mode de gestion et de la taille des bassins versants au Québec". *Revue des sciences de l'eau* 20: 127-146.
- Assani A. A., Landry R., Daigle J., Chalifour A. (2011). "Reservoirs effects on the interannual variability of winter and spring streamflow in the St-Maurice River watershed (Quebec, Canada)". *Water Resources Management* 25: 3661-3675.
- Assani A. A., Landry R., Laurencelle M. (2012). "Comparison of interannual variability modes and trends of seasonal precipitation and streamflow in Southern Quebec (Canada)". *River Research and Applications* 28: 1740-1752.
- Baltas E.A., Mimikou M.A. (1997). "Climate change impact on the reliability or hydroelectric energy production". National Technical University of Athens. [En ligne]. [http://itia.ntua.gr/hsj/42/hysj\\_42\\_05\\_0661.pdf](http://itia.ntua.gr/hsj/42/hysj_42_05_0661.pdf) (page consultée le 1<sup>er</sup> mai 2013).
- Bates, B. C., Z. W. Kundzewicz., S. Wu et J. P. Palutikof, éd., (2008): *Le changement climatique et l'eau*, document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, 236 p.
- Brown, R. D. (2010), "Analysis of snow cover variability and change in Québec, 1948-2005." *Hydrological Processes* 24: 1929-1954. doi: 10.1002/hyp.7565.
- CEHQ, Centre expertise hydrique du Québec, 2003. [En ligne] <http://www.cehq.gouv.qc.ca/> (consulté le 1<sup>er</sup> mai 2013).

CEHQ. (2011). Répertoire des barrages. [En ligne] <http://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages/default.asp> (page consultée le 1<sup>er</sup> mai 2013).

Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, S. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W. T. Kwon, R. Laprise, V. Magana Rueda, L. Mearns, C.G. Menendez, J. Raisanen, A. Rinke, A. Sarr et P. Whetton. "Regional Climate Projections", dans *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis*, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, S. Salomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignot et H.L. Miller (ed.), Cambridge University Press, Cambridge et New York, (2007) p. 847-940.

Fortier C, Assani AA, Mesfioui M, Roy AG (2011) Comparison of the interannual and interdecadal variability of heavy flood characteristics upstream and downstream from dams in inversed hydrologic regime: case study of Matawin River (Québec, Canada). *River Research and Applications* 27: 1277-1289.

GIEC, (2007): Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 pages.

Hotchkiss RH, Jorgensen SF, Stone Mc, Fontaine TA. (2000). "Regulated river modeling for climate change. Impact assessment: The Missouri River". *Journal of American Association of Water Resources* 36: 375-386.

Hydro-Québec. (2013) Histoire de l'électricité au Québec [En ligne] <http://www.hydroquebec.com/comprendre/histoire/index.html> (page consultée le 1<sup>er</sup> mai 2013)

IPCC, Intergovernmental panel on climate change. (2012). GIEC en français [En ligne] [http://www.ipcc.ch/home\\_languages\\_main\\_french.shtml#UeWt0PWwV0c](http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.shtml#UeWt0PWwV0c) (page consultée le 1<sup>er</sup> mai 2013).

Jay DA, Naik PK. (2011). "Distinguishing human and climate influences on hydrological disturbance processes in the Columbia River, USA". *Hydrological Sciences Journal* 56: 1186-1209.

Lajoie F., A. A. Assani, A.G. Roy et M. Mesfioui (2007). "Impacts of dam on monthly flow characteristics. The influence of watershed size and seasons". *Journal of Hydrology* 334: 423-439.

- Lemmen, D.S., F.J. Warren, J. Lacroix et E. Bush (éditeurs). *Vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007*, Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), 2008, 448 p.
- Lombard F. (1987). "Rank tests for changepoint problems". *Biometrika* 74: 615-624.
- López-Moreno JI, Vicente-Serrano SM, Begueria S, Gracia-Ruiz JM, Portela MM, Almeida AB (2009) "Dam effects on droughts magnitude and duration in a Transboundary basin: The Lower River Tagus, Spain and Portugal". *Water Resources Research* 45: W02405, doi: 10.1029 / 2008WR007198.
- Mailhot, A., S. Duchesne, D. Caya et G. Talbot. (2007) "Assessment of future change in intensity-duration-frequency curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model", *Journal of Hydrology*, vol. 347, n 1-2, p. 197-210.
- Matteau M, Assani AA, et Mesfioui M. (2009). "Application of multivariate statistical analysis methods to the dam hydrologic impact studies". *Journal of Hydrology*, 371, 120-128.
- MDDEFP, Ministère du développement durable, de l'environnement, de la faune et des parcs. (2002). *Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et visant à renforcer leur protection*. [En ligne] <http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/protection/index.htm> (page consultée le 1<sup>er</sup> mai 2013).
- Moyle PB, Mount JF. (2007). "Homogenous rivers, homogenous faunas". *Proceedings of National Academic Sciences USA* 104: 5711-5712.
- Naik PK, Jay DA. (2011a). "Human and climate impacts on Columbia River hydrology and salmoids". *River Research and Applications* 27: 1270-1276.
- Naik PK, Jay DA. (2011b). "Distinguishing human and climate influences on the Columbia River: Changes in mean flow and sediment transport". *Journal of Hydrology* 404: 259-277.
- Ouranos. *S'adapter aux changements climatiques*, Ouranos [Consortium], Montréal, 2004. 83 p.
- Ouranos. *Savoir s'adapter aux changements climatiques*, D. Chaumont, P. Gosselin, D. Houle, C. Larrivée, N. Lease, R. Roy, J.-P. Savard, R. Turcotte et C. Villeneuve, Montréal, 2010. 128 p.

- Ouarda TBMJ., Rasmussen PF., Cantin J-F, Bobée B, Laurence R, Hoang VD, Barabé G. (1999). "Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec". *Revue des Sciences de l'Eau* 12: 425-448.
- Piron M, Neumann K. (2008). "Hydrologic alterations in the Wabash River watershed, USA". *River Research and Applications* 24: 1175-1184.
- Plummer, D.A., D. Caya, A. Frigon, H. Cote, M. Giguere, D. Paquin, S. Biner, R. Harvey et R. de Elia. (2006). "Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM", *Journal of Climate*, vol. 19, no 13, p. 3112-3132.
- Poff NL, Olden JD, Merritt DM, Pepin DM. (2007). "Homogenization of regional river dynamics by dams and global biodiversity implications". *Proceedings of National Academic Sciences USA* 104: 5732-5737.
- Quessy J-F, Favre A-C, Saïd M, Champagne M. (2011). "Statistical inference in Lombard's smooth-change model". *Environmetrics* 22: 882-893.
- St-Jacques JM, Sauchyn DJ, Zhao Y. (2010). "Northern Rocky Mountain streamflow records: global warming trends, human impacts or natural variability?" *Geophysical Research Letters* 37: L06407, doi: 10.1029 / 2009GL042045.
- Villarini G, Smith JA. (2010). "Flood peak distributions for the eastern United States". *Water Resources Research* 46: W06504, doi: 10.1029 / 2009WR008395.
- Villarini G, Smith JA, Serinaldi F, Ntelekos AA. (2011a). "Analyses of seasonal and annual maximum daily discharge records for central Europe". *Journal of Hydrology* 399: 299-312.
- Villarini G, Smith JA, Serinaldi F, Ntelekos AA, Schwarz U. (2011b). "Analyses of extreme flooding in Austria over the period 1951-2006". *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.2331 (in press)
- Vincent, L.A. et E. Mekis. (2006). "Changes in daily and extreme temperature and precipitation indices for Canada over the twentieth century", *Atmosphere Ocean*, vol. 44, no 2, p. 177-193.
- WCD, Dams and development, the report of the world commission on dams, (2000). [En ligne] [http://www.internationalrivers.org/files/attached-files/world\\_commission\\_on\\_dams\\_final\\_report.pdf](http://www.internationalrivers.org/files/attached-files/world_commission_on_dams_final_report.pdf) (consultée le 1<sup>er</sup> mai 2013).



- Yagouti, A., G. Boulet, L.A. Vincent, L. Vescovi et E. Mekis. (2008). "Observed changes in daily temperature and precipitation indices for Southern Quebec, 1960-2005". *Atmosphere Ocean*, vol. 46, no 2, p. 243-256.
- Zhang, X., L.A. Vincent, W.D. Hogg et A. Niitsoo. (2000). "Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century" *Atmosphere-Ocean*, vol. 38, no 3, p. 395-429.
- Zhao Q, Liu S, Deng L, Dong S, Yang J, Wang C. (2012). "The effects of dam construction and precipitations variability on hydrologic alteration in the River Basin of Southwest China". *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, doi: 10.1007/s00477-012-0583-z (in press).